

Estudio técnico económico para la producción de aceite desparafinado que permita obtener base lubricante parafínica pesada mediante el cargue del destilado pesado de la U-130 en la unidad U-1200 MEC del Departamento de Parafinas y Fenol de la Refinería de Barrancabermeja

Cristian Darío Plazas Vesga; Pablo Cesar Jiménez Serna

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero de Procesos de Refinación y Petroquímica

Director

PhD, Carlos Jesus Muvdi Nova

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingeniería Físicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

A mi madre ALIX VESGA PADILLA quien me dio el ser y la vida, a mi abuela ELENA PADILLA DE VESGA quien, con su esfuerzo y dedicación pudo hacer de mí una persona de bien, a mi compañera LAURA PINZÓN CARRETERO que siempre me apoyo y me dio una voz de aliento para no desfallecer en el intento y alcanzar el objetivo propuesto, a mi hijo SANTIAGO ANDRES PLAZAS MARTINEZ para que vea en su padre un ejemplo de dedicación y esfuerzo para alcanzar las metas que se proponga y a todos mis amigos que me apoyaron de manera incondicional.

**Cristian Dario Plazas Vesga**

### **Dedicatoria**

Esta tesis está dedicada la memoria de mi padre GILBERTO JIMENEZ MOLINA, a pesar de nuestra distancia física, siento que estás conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí. A mi madre ROSMIRA SERNA, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su franca fe en que podía cumplir mis retos y decisiones, siendo un apoyo incondicional a pesar de sus quebrantos de salud. A mis hijas TANIA, VANESSA, PAULA y MARIANA, pues entendieron que ceder su tiempo de hijas, era importante para que yo pudiera cumplir este compromiso familiar. A mi esposa REINA PATRICIA GALVIS SANCHEZ, porque durante este proceso, asumió mis cambios emocionales como propios al igual que los triunfos y las oportunidades de mejoramiento y su creencia férrea de que podíamos lograrlo como equipo.

**Pablo Cesar Jiménez Serna**

## **Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean expresar su agradecimiento a todos aquellos seres que contribuyeron a la realización del presente proyecto de grado, especialmente:

A Dios por permitirnos el don de la vida y la salud para poder avanzar en este camino del aprendizaje, la construcción y la visión.

A la Universidad Industrial de Santander y a sus profesores que trazaron el camino para nuestra formación como profesionales y nos proporcionaron los conocimientos y valores necesarios para lograrlo.

A Ecopetrol S.A por creer en sus trabajadores y fomentar la educación profesional de los mismos en búsqueda de mejorar sus competencias laborales.

## Tabla de contenido

Introducción	16
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. Marco conceptual	19
3. Estado del arte	25
4. Metodología	27
4.1 Fase I. Análisis de la producción de aceite desparafinado mediante corridas de prueba en planta piloto	28
4.2 Fase II. Análisis técnico corrida con DPP a nivel industrial en la U-1200 MEC.	30
4.3 Fase III. Evaluación del impacto económico del destilado parafínico pesado como nueva alternativa de carga para la U-1200 MEC.	31
5. Análisis de Resultados	32
5.1 Caracterización fisicoquímica del DPP	32
5.1.1 <i>Comparativo de las características de las cargas de la U-1200 MEC</i>	34
5.1.2 <i>Resultados corridas planta piloto U-4100</i>	39
5.1.2.1 Balance masico y caracterización de productos.	39
5.2 Análisis técnico de la corrida con DPP a nivel industrial en la U-1200 MEC	46
5.3 Evaluación del impacto económico	51
6. Conclusiones	57
7. Recomendaciones	58

Referencias Bibliográficas

59

Apéndices

60

## Lista de figuras

Figura 1. <i>Esquema operacional de la unidad U-1200 de desparafinado con MEC - Tolueno</i>	20
Figura 2. <i>Diseño metodológico</i>	27
Figura 3. <i>Toma de muestras para análisis de laboratorio</i>	28
Figura 4. <i>Fotografía Planta Piloto U-4100 Desparafinado de Bases Lubricantes</i>	30
Figura 5. <i>Curva de la destilación de las muestras del DPP</i>	33
Figura 6. <i>Resultados análisis SARA del DPP.</i>	34
Figura 7. <i>Grafica curvas de destilación DPL, DPM, DPP y DAO</i>	37
Figura 8. <i>Resultados análisis SARA de los DPL y DPM.</i>	38
Figura 9. <i>Comparativo de los resultados SARA del DPL, DPM y DPP. a) Saturados, b) Aromáticos, c) Resinas, d) Asfáltenos.</i>	38
Figura 10. <i>Proceso de separación de la cera del solvente en laboratorio.</i>	39
Figura 11. <i>Proceso de separación del solvente del aceite (Desparafinado, Repulpa, Residual).</i>	40
Figura 12. <i>Esquema de un filtro rotativo y su ciclo de operación.</i>	49
Figura 13. <i>Vista superior del trayecto de línea de DPP desde la U-130 hasta el K-1275</i>	53

## Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Límites de calidad de las cargas, tanques y características típicas.</i>	20
Tabla 2. <i>Rendimientos establecidos por diseño para las unidades del Departamento de Parafinas y Fenol.</i>	21
Tabla 3. <i>Límites de calidad de las Bases Ecopetrol Parafínicas.</i>	23
Tabla 4. <i>Condiciones operacionales planta piloto U-4100</i>	29
Tabla 5. <i>Destilación y características físicas del DPP.</i>	32
Tabla 6. <i>Comparaciones curvas de destilación y características físicas de los DPL, DPM, DAO con el DPP.O DAO con el DPP</i>	35
Tabla 7. <i>Balance masico y velocidades de filtración corridas de prueba planta piloto.</i>	41
Tabla 8. <i>Caracterización del aceite desparafinado y la cera desaceitada pesada.</i>	44
Tabla 9. <i>Variables típicas operacionales de la U-1200 para una corrida con DPM</i>	46
Tabla 10. <i>OPEX de los departamentos de Refinación de crudos y Parafinas para el año 2022.</i>	51
Tabla 11. <i>CAPEX alternativa N°1.</i>	54
Tabla 12. <i>Producción proyectada de barriles de base lubricante a partir del DPP.</i>	55
Tabla 13. <i>Resultados de los Indicadores Financieros</i>	56

### **Lista de Apéndices**

Apéndice A. Formato toma de datos de operación U-4100	61
Apéndice B. Plano unidad de desparafinado de bases lubricantes U-4100	62

## Glosario

**ASTM:** American Society for Testing and Materials

**Base lubricante:** Derivado del petróleo que se emplea para la fabricación de aceite lubricantes

**Bbl:** Barril

**BPH:** Barril por hora

**BPDO:** Barril por día de operación

**Desparafinado:** Aceite obtenido por medio del proceso de filtración libre de ceras de tipo parafínicas.

**DAO:** Aceite desasfaltado

**DPL:** Destilado parafínico liviano

**DPM:** Destilado parafínico medio

**DPP:** Destilado Parafínico Pesado

**EBP:** Punto final de ebullición

**Fenol:** Compuesto químico de naturaleza acida empleado en la industria petroquímica para retirar los aromáticos y nafténicos contaminantes de las bases lubricantes.

**GAO:** Gasóleo

**GRB:** Gerencia Refinería Barrancabermeja

**Gravedad API:** Medida de densidad que, en comparación con el agua a temperaturas iguales, precisa cuán pesado o liviano es el petróleo.

**IBP:** Punto inicial de ebullición

**MEC:** Metil Etil Cetona

**MDU:** Manual de descripción de la unidad

**Solvente:** sustancia química la cual es empleada para disolver un soluto

**Tolueno:** Hidrocarburo de tipo aromático que se produce a partir del benceno.

**Topping:** Unidad de Destilación Primaria

## Resumen

**Título:** Estudio técnico económico para la producción de aceite desparafinado que permita obtener base lubricante parafínica pesada mediante el cargue del destilado pesado de la U-130 en la unidad U-1200 MEC del Departamento de Parafinas y Fenol de la Refinería de Barrancabermeja<sup>1</sup>

**Autores:** Cristian Dario Plazas Vesga – Pablo Cesar Jiménez Serna<sup>\*\*</sup>

**Palabras Claves:** Destilado, Desparafinado, Base lubricante, Gasóleo.

## Descripción

El presente proyecto de investigación evaluó la alternativa de usar el destilado parafínico pesado, proveniente de la U-130 de destilación al vacío, que en la actualidad se encuentra direccionado al cabezal de gasóleo de la Refinería, como carga a la U-1200 MEC del Departamento de Parafinas y Fenol, tomando como base su caracterización fisicoquímica y el potencial de transformación, con el objeto de procesarlo para producir una nueva base lubricante que cumpla con los requerimientos del mercado, generando valor agregado al poder convertirse en un nuevo integrante del portafolio de productos de Ecopetrol S.A.

Para el desarrollo del proyecto se empleó una metodología de tipo experimental, cuantitativa y analítica, realizando corridas de prueba a escala piloto en la U-4100 de desparafinado de bases lubricantes, de donde se obtuvieron diversas muestras que fueron posteriormente analizadas en el laboratorio de la Refinería. Los resultados obtenidos nos permiten inferir el uso del destilado parafínico pesado como carga a la U-1200 de

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería química. Ingeniería de refinación y proceso petroquímicos. Director del trabajo de investigación: Carlos Jesus Muvdi Nova.

donde el aceite desparafinado obtenido posee el potencial de convertirse en una base lubricante, reduciendo con esto la generación de corrientes de menor valor al darle una segunda opción de uso. Al utilizar el DPP es posible incrementar en un 30% la producción de base lubricante parafínica media al mes del Departamento de Parafinas y Fenol, lo cual se podría traducir en un ingreso monetario de 2,8 MUSD/mes aproximadamente.

## Abstract

**Title:** Technical economic study for the production of dewaxing oil that allows obtaining a heavy paraffinic lubricant base by loading the heavy distillate of the U-130 in the U-1200 MEC unit of the Department of Paraffins and Phenol of the Barrancabermeja Refinery\*

**Authors:** Cristian Dario Plazas Vesga – Pablo Cesar Jiménez Serna\*\*

**Keywords:** Distillate, Dewaxing, Lubricant base, Gasoil.

## Description

The present research project evaluated the alternative of using the heavy paraffinic distillate, coming from the U-130 vacuum distillation, which is currently directed to the Refinery's diesel head, as a load to the U-1200 MEC of the Department of Paraffins and Phenol, based on its physicochemical characterization and transformation potential, in order to process it to produce a new lubricant base that meets market requirements, generating added value by being able to become a new member of Ecopetrol SA portfolio.

For the development of the project, an experimental, quantitative and analytical methodology was used, carrying out test runs on a pilot scale in the U-4100 for the dewaxing of lubricant bases, from which various samples were obtained that were subsequently analyzed in the laboratory of the Refinery. The results obtained allowed inferring the use of heavy paraffinic distillate as a load to the U-1200 from where the dewaxed oil obtained has the potential to become a lubricant base, thereby reducing the generation of lower

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Petrochemical refining and process engineering. Director of the research work: Carlos Jesus Muvdi Nova.

value streams by giving it a second option of use. By using the DPP it is possible to increase by 30% the production of paraffinic lubricant base per month of the Department of Paraffins and Phenol, which could translate into a monetary income of approximately 2.8 MUSD/month.

## Introducción

La empresa colombiana de petróleos ECOPETROL S.A posee dentro de su catálogo de productos las bases lubricantes parafínicas Liviana, Media y Bright Stock. En la actualidad, las reservas de crudo con características parafínicas en Colombia son pequeñas en comparación con las de otros países. Esta situación ha llevado a las unidades de proceso de la Refinería de ECOPETROL S.A de Barrancabermeja, a adaptarse a dietas de crudos más pesados, lo cual trae consigo un aumento en los costos de producción, producto de la severidad de los procesos y del mantenimiento de los equipos.

Teniendo en cuenta este panorama, es necesario enfocar todos los esfuerzos para aprovechar al máximo la carga de crudos que llegan a la refinería, reduciendo al máximo la generación de corrientes de menor valor como el gasóleo (GAO). Actualmente, la corriente de destilado parafínico pesado (DPP), proveniente de la U-130 de destilación al vacío, es direccionada al cabezal de GAO, ya que es considerada un subproducto de poco valor. Sin embargo, y dada su composición química (parafinas, isoparafinas, asfáltenos, aromáticos, nafténicos, entre otros), permite considerarla de potencial interés para convertirse en carga para la unidad U-1200 de desparafinado con Metil Etil Cetona (MEC) y Tolueno. Esta unidad es la encargada de obtener el aceite desparafinado, materia prima para la producción de las bases lubricantes parafínicas, y así obtener una nueva base que se podría llamar Base Ecopetrol Parafínica Pesada, cuyas propiedades estarían ubicadas entre las de la base Media y la base Bright Stock.

El hecho de producir una nueva base lubricante parafínica con las características fisicoquímicas requeridas por el mercado le representa a ECOPETROL S.A el incremento de su portafolio de productos y la incorporación de nuevos clientes del segmento de bases lubricantes.

Actualmente, el negocio de las Bases lubricantes impacta de manera positiva el margen de ganancias de la refinería, el cual se vería favorecido si se pudiese incorporar y comercializar un nuevo producto de mayor valor comercial.

En este orden de ideas surge el interrogante...

¿Cómo podemos obtener desparafinado con las especificaciones de calidad requeridas para la producción de una nueva Base Lubricante Parafínica Pesada mediante el uso del destilado parafínico pesado de la U-130 como carga para la unidad U-1200 MEC?

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Realizar la evaluación técnico-económica para la producción de aceite desparafinado que permita obtener base lubricante parafínica pesada mediante el cargue del destilado pesado de la U-130 en la U-1200 MEC del departamento de Parafinas y Fenol de la Refinería Barrancabermeja.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Analizar la producción de aceite desparafinado mediante corridas de prueba en la unidad piloto U-4100 de Desparafinado de bases lubricantes.

- Efectuar el análisis técnico para una corrida con DPP a nivel industrial en la U-1200 MEC.

Evaluar el impacto económico del DPP como nueva alternativa de carga para la U-1200 MEC.

## 2. Marco conceptual

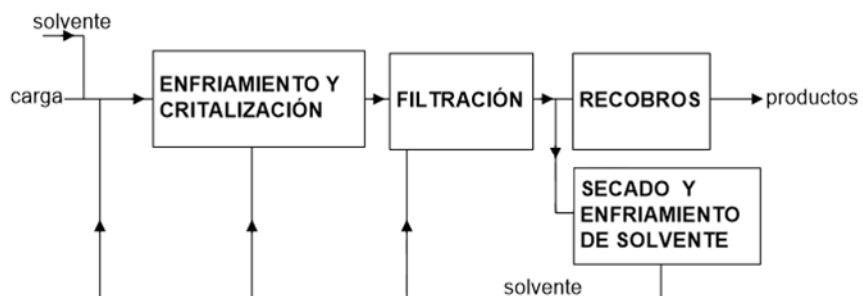
La U-130 de la Refinería de Barrancabermeja es una planta de destilación al vacío que procesa el crudo reducido proveniente de la unidad atmosférica. Al término del proceso, se obtienen diversos productos, como lo son: el Destilado Parafínico Liviano (DPL), Medio (DPM) y Fondos de vacío. Estos productos proveen la materia prima hacia las unidades del departamento de parafinas, en donde se realizan los procesos para la obtención de ceras parafínicas y bases lubricantes, los cuales se pueden dividir según las operaciones unitarias que se realizan en: Desparafinado con MEC - Tolueno, extracción líquido - líquido con fenol y tratamientos con hidrógeno.

El proceso de desparafinado se lleva a cabo en la U-1200 donde inicialmente se le inyecta solvente (50% MEC + 50% Tolueno) a la carga, para seguidamente enfriarla gradualmente favoreciendo la formación de los cristales de cera. A continuación, la mezcla fría de carga y solvente se somete a un proceso de filtrado mediante el cual se separan las ceras del aceite; es en este momento donde aparece el término de aceite desparafinado, el cual hace alusión al aceite libre de parafinas. Las temperaturas bajas permiten la precipitación de la cera, y el solvente facilita la separación del aceite lubricante de esta.

En la Figura 1 se ilustra el diagrama de flujo de la unidad U-1200 o unidad de desparafinado con MEC-Tolueno.

**Figura 1.**

*Esquema operacional de la unidad U-1200 de desparafinado con MEC - Tolueno*



*Nota.* Tomado del MDU de la U-1200 MEC

En la Tabla 1 se presentan los límites de calidad que deben cumplir los destilados, para ser procesados, y posteriormente, obtener los aceites desparafinados y las ceras.

**Tabla 1.**

*Límites de calidad de las cargas, tanques y características típicas.*

Carga	Unidad/Tanque	Característica Típica				
Producto	Origen/Destino	5% Destilación	95% Destilación	Densidad Lb/ft <sup>3</sup>	Viscosidad A 100°C Cst	Col or
<b>Destilado Liviano</b>	CDU/K-1272-73	345°C min	820°F max	53,31	3,9 a 4,6	2
<b>Destilado Medio</b>	CDU-K1274	375°C min	920°F max	53,16	7,0 a 8,0	4
<b>DAO</b>	DAP/K-1275	-	-	53,76	22 a 28	-

*Nota.* Tomado del MDU de la U-1200 MEC

El siguiente paso en el proceso de fabricación de bases lubricantes parafínicas se lleva a

cabo en la unidad de extracción líquido-líquido con fenol. Es en esta unidad donde al aceite desparafinado se le retiran los compuestos aromáticos y nafténicos, contaminantes que afectan el índice de viscosidad de la base lubricante; esto es posible debido a la afinidad del fenol por este tipo de compuestos polares.

De la extracción líquido-líquido se obtienen dos corrientes de proceso que son: el extracto fenólico, rico en contaminantes que se envía a GAO, y el Rafinato, producto compuesto principalmente por aceite lubricante, el cual finalmente es sometido a un proceso de hidrogenación, donde se le mejoran propiedades fisicoquímicas tales como: color, índice de viscosidad, viscosidad cinemática, contenido de azufre, entre otros, para finalmente obtener la base lubricante parafínica.

Llegado a este punto se requiere aclarar que cada unidad del departamento de parafinas posee valores de rendimientos esperados para sus productos y subproductos, los cuales le permiten al personal de operaciones e ingeniería de procesos, realizar un control de la operación, establecer metas de producción y realizar proyecciones y compromisos de ventas. En la Tabla 2 se pueden apreciar los valores de rendimientos esperados de las unidades según el diseño.

**Tabla 2.**

*Rendimientos establecidos por diseño para las unidades del Departamento de Parafinas y Fenol.*

CARGA	UNIDAD	PRODUCTOS	RENDIMIENTOS
DPL	U-1200 MEC	DESPARAFINADO	58%
		CERA DURA	28%
		RESIDUAL	14%
DPM	U-1200 MEC	DESPARAFINADO	58%
		CERA DURA	28%
		RESIDUAL	14%

CARGA	UNIDAD	PRODUCTOS	RENDIMIENTOS
DAO	U-1200 MEC	DESPARAFINADO	54%
		CERA DURA	10%
		RESIDUAL	36%
DESPARAFINADO LIVIANO	U-700 FENOL	RAFINATO	40%
		EXTRACTO	60%
DESPARAFINADO MEDIO	U-700 FENOL	RAFINATO	40%
		EXTRACTO	60%
DESPARAFINADO BRIGHT STOCK	U-700 FENOL	RAFINATO	30%
		EXTRACTO	70%
RAFINATO LIVIANO	U-1100 H2	BEPL	95%
		GAO	5%
RAFINATO MEDIO	U-1100 H2	BEPM	95%
		GAO	5%
RAFINATO BRIGHT STOCK	U-1100 H2	BEPBS	95%
		GAO	5%

El departamento de parafinas de la Refinería de Barrancabermeja ofrece dentro de su catálogo de productos tres tipos de bases lubricantes que son:

- Base Ecopetrol Parafínica Liviana – BEPL
- Base Ecopetrol Parafínica Media – BEPM
- Base Ecopetrol Parafínica *Bright Stock* – BEPBS

Es importante aclarar que, aunque en los nombres de los productos aparece la palabra parafínica, estos no poseen contenido alguno de parafinas (Ceras); el uso de este término es

exclusivamente para referirse al crudo de su procedencia.

Estas bases lubricantes deben cumplir con parámetros de calidad para poder ser ofertadas al mercado, los cuales son presentados en la Tabla 3.

**Tabla 3.**

*Límites de calidad de las Bases Ecopetrol Parafínicas.*

Propiedades	Método	Unidades	BASE		BASE			
			PARAFÍNICA		PARAFÍNICA			
			LIVIANA		MEDIA		BRIGHT STOCK	
			Mínim	Máxim	Mínim	Máxim	Mínim	Máxim
			o	o	o	o	o	o
Color ASTM	D1500			1,5		3,5		5
Corrosión lámina de cobre	D130			1		1		1
Contenido de agua y sedimento	D96	% Vol		0,05		0,05		0,05
Contenido de fenol	UOP262	% masa		0,03		0,03		0,03
Índice de viscosidad	D2270			95		95		84
Número de neutralización	D664	mgKOH/ g		0,05		0,05		0,05
Punto de fluidez	D97	°C		0		0		0

<b>Punto de inflamación</b>	D92	°C	200	220	268		
<b>Residuo de Carbón Conradson</b>	D4530	%masa		0,05	0,1	0,7	
<b>Tiempo de separación de la emulsión</b>	D1401	Min		15	15	15	
<b>Volatilidad</b>	D2887- NOAK	%masa		15			
<b>Viscosidad a 100°C</b>	D445	mm <sup>2</sup> /s	4,3	5,0	8,0	9,0	26 34

### 3. Estado del arte

La presente propuesta busca evaluar como opción de aprovechamiento, el uso de la corriente de destilado parafínico pesado como carga para la U-1200 MEC, para obtener un aceite desparafinado que permita, al final de la cadena de producción, producir una nueva base lubricante parafínica. Como antecedentes de esta opción de aprovechamiento se puede citar a Al Nagar & El Shamy (2007) quienes sometieron tres materias primas suministradas por *Alexandria Petroleum Company* a una extracción líquido – líquido a escala de banco como primer paso en la refinación, usando N-metilpirrolidona (NMP) y NMP que contenía 10% de etanolamina en las condiciones de extracción más adecuadas. Los refinatos obtenidos se desparafinaron con disolvente en condiciones de desparafinado constantes, para posteriormente someterlos a un proceso de adsorción y producir aceites base terminados, los cuales cumplían con las especificaciones para ser catalogados como bases lubricantes.

De igual manera, Gonzalez Garnica (2016) realizó pruebas a nivel de planta piloto en la unidad de desparafinado con MEC-tolueno del Instituto Colombiano del Petróleo – ICP, empleando como carga el gasóleo hidrogenado (GAOH) y el Fondo de la Torre T-2653 producto del *mild-hydrocracking* realizado en la planta de Unibón (U-2650) de la Refinería de Barrancabermeja. De estas pruebas se pudo concluir que el porcentaje de cera es inferior al 2% para las dos cargas evaluadas, y que el porcentaje de aceite desparafinado está por encima del porcentaje obtenido en evaluaciones anteriores de cargas hidrocraqueadas (UCO): FT-2653 93,3 %, GAOH 89,3% vs UCO 75 %, aproximadamente.

Por consiguiente, se espera que al emplear el destilado pesado como carga para la U-1200 MEC se obtengan resultados favorables en cuanto al rendimiento y la calidad del desparafinado,

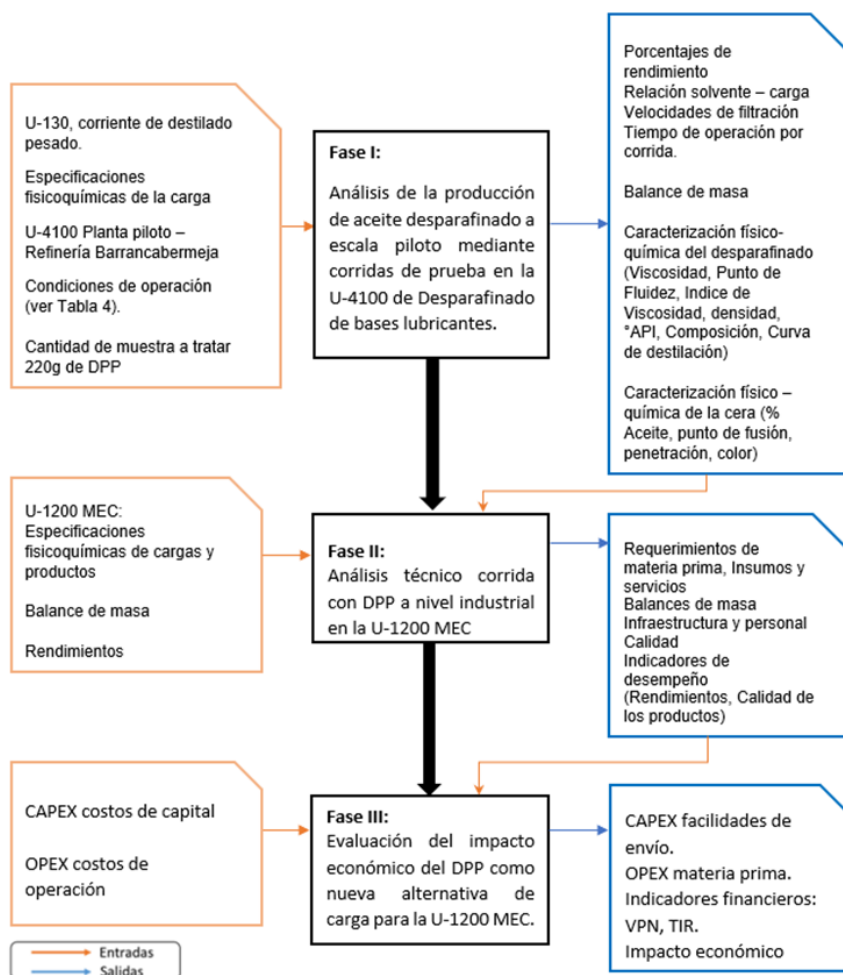
que permita la producción de la Base Lubricante Parafínica Pesada.

## 4. Metodología

Con el desarrollo de las corridas en planta piloto junto con los análisis de laboratorio nos permitirá establecer el potencial de utilización del DPP como carga a la U-1200 para la producción de un aceite desparafinado que permita obtener una nueva base lubricante pesada, siguiendo las tres fases del presente modelo metodológico:

**Figura 2.**

*Diseño metodológico*



#### 4.1 Fase I. Análisis de la producción de aceite desparafinado mediante corridas de prueba en planta piloto

Para el desarrollo de la Fase I, inicialmente se aseguró que la unidad U-130 se encontraba en corrida con crudo Cusiana, lo cual permite de cierta manera contemplar la oportunidad de obtener una carga aprovechable en la U-1200 MEC debido a sus características parafínicas. Seguidamente se tomaron dos muestras de 250ml de DPP en recipientes metálicos por parte del operador del área, en el toma muestra ubicado en la succión de la bomba SP-136AB ver Figura 3, la cual envía el producto desde la torre despojadora T-132C hacia tanques de almacenamiento.

#### Figura 3.

*Toma de muestras para análisis de laboratorio*



Las muestras recolectadas se enviaron al laboratorio de la refinería, en donde previo requerimiento y aprobación por parte de la coordinación de inspección y calidad, se le practicaron diversos análisis cuantitativos los cuales se basan en las normas ASTM tales como, destilación simulada D6352, Gravedad API y densidades D4052-18a, Viscosidad cinemática a 100°C D445-19a, Insolubles en N-Heptano D3279-12e1, Micro carbón residual D4530-15, Azufre D4294-16E1 y la técnica de análisis SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfáltenos), de donde se obtuvo

la caracterización físico-química del destilado y su composición.

Finalmente, se recolectó una muestra de 5 US gal de DPP, la cual se empleó como carga para las corridas de prueba en la planta piloto U-4100 de Desparafinado de bases lubricantes (ver Figura 4), ubicada en la U-130 del departamento de refinación de crudos de la Refinería de Barrancabermeja. Se realizaron 12 corridas de prueba con las condiciones operacionales especificadas en la Tabla 4.

Para el desarrollo de las corridas se emplearon 220g de DPP y 1000ml de mezcla de solvente MEC: Tolueno 1:1 volumen.

**Tabla 4.**

*Condiciones operacionales planta piloto U-4100*

<b>Parámetros</b>	<b>Temperatura, °C</b>	<b>Relación S/C</b>
<b>Dilución 1</b>	50	0,8
<b>Dilución 2</b>	18,3	0,5
<b>Dilución 3</b>	10	1,05
<b>Dilución 4</b>	-6,6	1,1
<b>Dilución 5</b>	-10,5	0,56
<b>TOTAL S/C</b>		4,0
<b>ETAPA DESPARAFINADO</b>	-20	
<b>Lavado torta</b>	-20	0,8
<b>Solvente de dilución</b>	-12	2,3
<b>ETAPA REPULPA</b>	-12	
<b>Lavado torta</b>	-12	0,8
<b>Solvente de dilución</b>	12,7	1,9
<b>ETAPA DESACEITADO</b>	12,7	

Parámetros	Temperatura, °C	Relación S/C
Lavado torta	12,7	0,8
Concentración MEC	50%	

#### Figura 4.

*Fotografía Planta Piloto U-4100 Desparafinado de Bases Lubricantes*



#### 4.2 Fase II. Análisis técnico corrida con DPP a nivel industrial en la U-1200 MEC.

La Fase II inició con la recopilación de la información contenida en el paquete de tecnología de proceso de la U-1200 MEC, que incluyó las bases de diseño de los equipos y de diseño del proceso. De la información obtenida se trabajó principalmente en las variables operacionales, a las cuales se somete la carga durante una operación estándar, tales como, flujos de carga, relación solvente – carga, curvas de enfriamiento y velocidades de filtración, siendo estas las principales variables que determinan el rendimiento y la calidad del desparafinado. Posteriormente, se realizó un comparativo con los resultados obtenidos en las pruebas piloto (Fase I), de donde se determinaron los requerimientos necesarios, para poder efectuar el análisis técnico

de la corrida a nivel industrial en la U-1200 MEC, fundamentado en el análisis conceptual y los retos a superar.

#### **4.3 Fase III. Evaluación del impacto económico del destilado parafínico pesado como nueva alternativa de carga para la U-1200 MEC.**

En la Fase III se realizó el análisis preliminar de los costos de capital (CAPEX) y los costos de operación (OPEX) en los cuales incurrirá el Departamento de Parafinas y Fenol, para poder procesar el DPP en sus instalaciones mediante el uso de una plantilla ofimática. Para el caso de los CAPEX se calculó únicamente el costo de las facilidades que se requieren para llevar el DPP desde la U-130 hasta el tanque de almacenamiento en el Departamento de Parafinas. Para los OPEX se enfocó en el costo de la materia prima, los demás costos de operación como son los insumos, servicios industriales, mano de obra, mantenimiento, entre otros, no se verán afectados, ya que el diseño de la planta no sufrirá cambios y por consiguiente estos se mantendrán, así mismo, no se tuvieron en cuenta los costos de operación de cada una de las unidades de proceso del Departamento de Parafinas y del Hidrógeno empleado en el proceso de hidrotratamientos, los cuales Ecopetrol S.A los contempla en la fase de ingeniería de detalle para sus proyectos. Finalmente, se determinó de manera preliminar el impacto en el margen económico de los Departamentos de Refinación de Crudos y Parafinas, como resultado de la ejecución de este proyecto, realizando una estimación de la cantidad de base lubricante pesada que se podría producir. Para establecer el impacto económico, también se tuvo en cuenta los indicadores financieros VPN y TIR, realizando una comparación con el valor que tendría si se degradará al cabezal de GAO, como está ocurriendo en la actualidad.

## 5. Análisis de Resultados

### 5.1 Caracterización fisicoquímica del DPP

En la Tabla 5 se presentan los análisis fisicoquímicos practicados en el laboratorio de la Refinería a las muestras de DPP.

**Tabla 5**

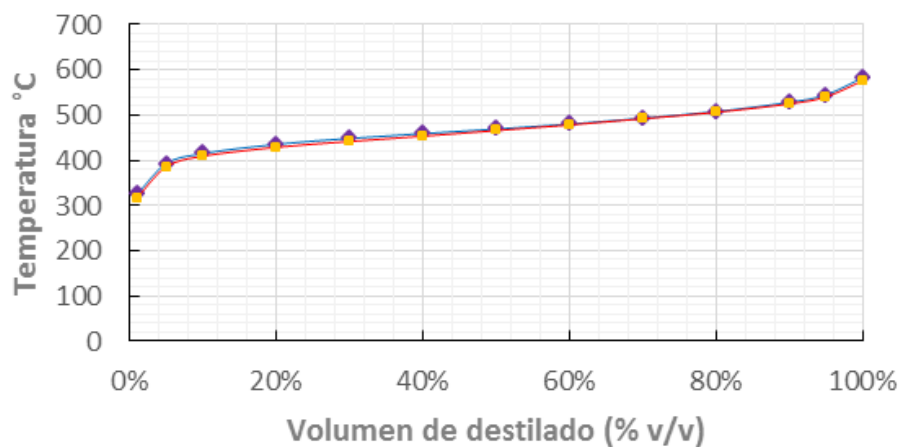
*Destilación y características físicas del DPP.*

Norma	Parámetro	Muestra	Muestra No 2	Promedio	Unidad
		No1 DPP	DPP		
ASTM D 6352	<b>Pto. Inicial de Ebullición</b>	324,40	316,70	320,55	°C
ASTM D 6352	<b>5% vol Recobrado</b>	392,70	385,60	389,15	°C
ASTM D 6352	<b>10% vol Recobrado</b>	414,90	409,00	411,95	°C
ASTM D 6352	<b>20% vol Recobrado</b>	435,30	428,70	432,00	°C
ASTM D 6352	<b>30% vol Recobrado</b>	448,30	441,60	444,95	°C
ASTM D 6352	<b>40% vol Recobrado</b>	458,80	453,20	456,00	°C
ASTM D 6352	<b>50% vol Recobrado</b>	469,10	465,70	467,40	°C
ASTM D 6352	<b>60% vol Recobrado</b>	479,90	478,10	479,00	°C
ASTM D 6352	<b>70% vol Recobrado</b>	493,00	491,90	492,45	°C
ASTM D 6352	<b>80% vol Recobrado</b>	507,70	506,00	506,85	°C
ASTM D 6352	<b>90% vol Recobrado</b>	528,10	524,80	526,45	°C
ASTM D 6352	<b>95% vol Recobrado</b>	544,50	540,20	542,35	°C
ASTM D 6352	<b>Pto. Final de Ebullición</b>	582,60	575,70	579,15	°C

Norma	Parámetro	Muestra	Muestra No 2	Promedio	Unidad
		No1 DPP	DPP		
ASTM D 4052-18a	<b>Gravedad API</b>	22,30	21,80	22,05	API
ASTM D 4052-18a	<b>Densidad A 15 °C</b>	919,40	922,30	920,85	KG/m3
ASTM D 4052-18a	<b>Densidad A 60° F</b>	919,00	921,90	920,45	KG/m4
ASTM D 445-19a	<b>Viscosidad cinemática a 100°C</b>	10,80	11,38	11,09	mm/s2
ASTM D 3279-12e1	<b>Insolubles en N- Heptano</b>	0,05	0,05	0,05	g/100gr
ASTM D 4530-15	<b>Microcarbon residual</b>	0,36	0,36	0,36	g/100gr
ASTM D 4294- 16€1	<b>Azufre</b>	0,57	0,42	0,50	g/100gr
ASTM D 4294- 16€1	<b>Azufre en PPM</b>	5679,00	4236,00	4957,50	ppm
ASTM	<b>Color</b>				Clasificación
ASTM	<b>Volatilidad</b>				g/100gr

**Figura 5.**

*Curva de la destilación de las muestras del DPP*

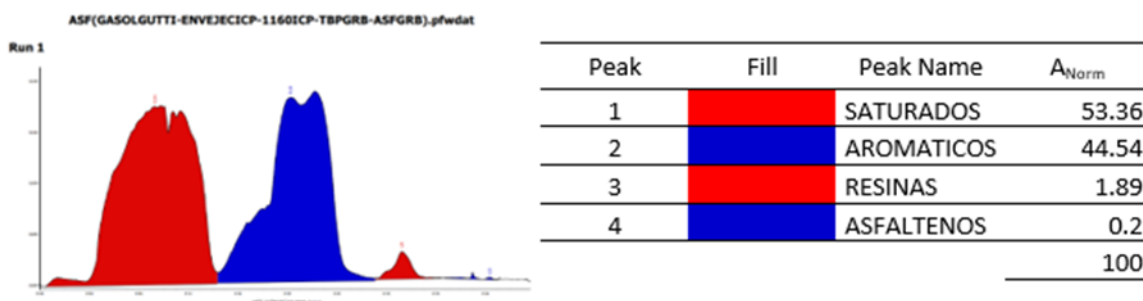


De la Figura 5 se puede evidenciar que los datos de la destilación de ambas muestras son muy similares y varían muy poco pese a que fueron tomadas con un mes de diferencia. Esto garantiza que es factible usar el valor promedio de las dos destilaciones del DPP para efectos de análisis posteriores.

Del análisis SARA practicado al DPP, ilustrado en la Figura 6, se puede determinar que su composición es de un 53,36% de hidrocarburos saturados, 44,54% de hidrocarburos aromáticos, 1,89% de resinas y 0,2% de asfáltenos. Estos resultados indican que las muestras analizadas poseen una cantidad considerable de aceite parafínico (Saturados) que se puede aprovechar y que por la cantidad de compuestos aromáticos que contiene lo hace un candidato para el tratamiento de extracción líquido – líquido en la planta de Fenol.

### Figura 6.

*Resultados análisis SARA del DPP.*



#### 5.1.1 Comparativo de las características de las cargas de la U-1200 MEC

Acto seguido se compararon los resultados de la destilación del DPP con los de las cargas típicas de la U-1200 MEC, el DPL, DPM y DAO, los cuales se presentan en la Tabla 6 y en la

Figura 7.

**Tabla 6.**

*Comparaciones curvas de destilación y características físicas de los DPL, DPM, DAO con el DPP.*

Norma	Parámetro	Promedio	DPL	DPM	DAO	Unidad
		<i>DPP</i>				
ASTM D 6352	<b>Pto. Inicial de Ebullición</b>	321	314	307	392	°C
ASTM D 6352	<b>5% vol Recobrado</b>	389	354	381	443	°C
ASTM D 6352	<b>10% vol Recobrado</b>	412	367	403	469	°C
ASTM D 6352	<b>20% vol Recobrado</b>	432	383	422	487	°C
ASTM D 6352	<b>30% vol Recobrado</b>	445	392	432	498	°C
ASTM D 6352	<b>40% vol Recobrado</b>	456	400	441	516	°C
ASTM D 6352	<b>50% vol Recobrado</b>	467	405	449	529	°C
ASTM D 6352	<b>60% vol Recobrado</b>	479	412	458	542	°C
ASTM D 6352	<b>70% vol Recobrado</b>	492	417	468	562	°C
ASTM D 6352	<b>80% vol Recobrado</b>	507	422	480	582	°C
ASTM D 6352	<b>90% vol Recobrado</b>	526	430	497	625	°C
ASTM D 6352	<b>95% vol Recobrado</b>	542	435	509	658	°C
ASTM D 6352	<b>Pto. Final de Ebullición</b>	579	452	537	694	°C
ASTM D 4052-18a	<b>Gravedad API</b>	22	26,7	24,6	*	API
ASTM D 4052-18a	<b>Densidad A 15 °C</b>	921	894,8	907	*	KG/m <sup>3</sup>
ASTM D 4052-18a	<b>Densidad A 60° F</b>	920	894,4	906,6	*	KG/m <sup>4</sup>
ASTM D 445-19a	<b>Viscosidad cinemática a 100°C</b>	11,09	4,01	7,58	29,4	mm/s <sup>2</sup>

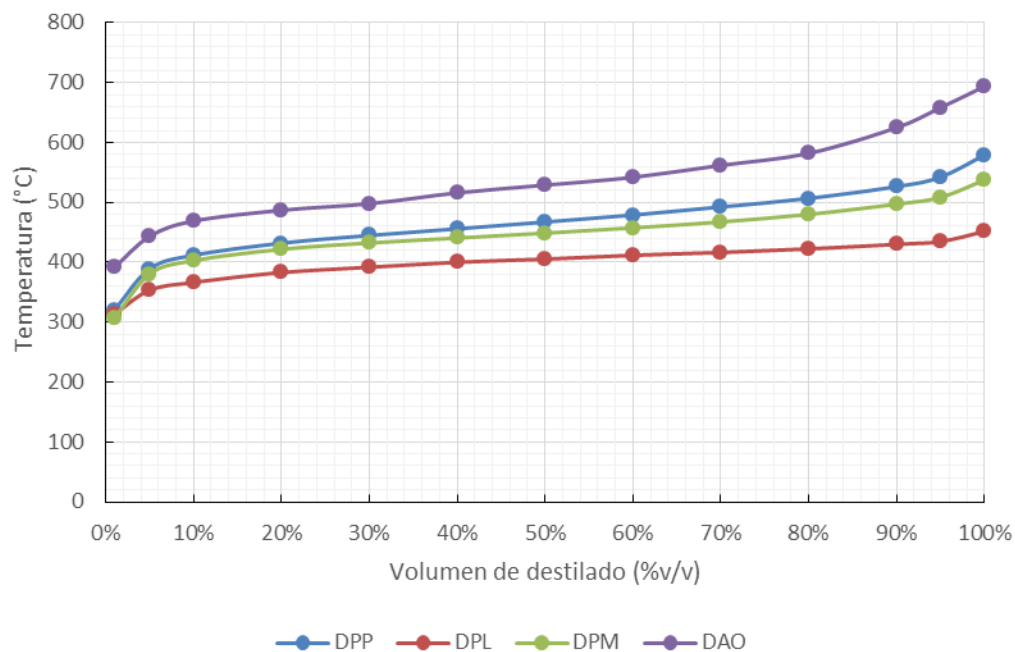
Norma	Parámetro	<i>Promedio</i>	<i>DPL</i>	<i>DPM</i>	<i>DAO</i>	<i>Unidad</i>
<i>DPP</i>						
ASTM D 3279-12e1	<b>Insolubles en N-Heptano</b>	0,05	0,03	0,06	*	g/100gr
ASTM D 4530-15	<b>Microcarbon residual</b>	0,36	0,05	0,08	1,68	g/100gr
ASTM D 4294-16E1	<b>Azufre</b>	0,50	0,33	0,39	*	g/100gr
ASTM	<b>Color</b>		11,5	3,5	*	Clasificación
ASTM	<b>Volatilidad</b>		14,5	4,4	*	g/100gr

\*Parámetro sin histórico en base de datos

De la información consignada en la Tabla 6 y en la Figura 7 se puede observar que, tanto la destilación como los valores de las características físicas del DPP, se encuentran ubicados entre el rango del DPM y el DAO. Se observaron diferencias marcadas en los valores de los parámetros de viscosidad cinemática a 100°C, Microcarbon residual y azufre, debido principalmente a la presencia de compuestos pesados, lo cual puede suponer dificultades en el proceso de filtración a nivel industrial, al presentarse ensuciamiento de los poros de la lona en los filtros rotativos.

**Figura 7.**

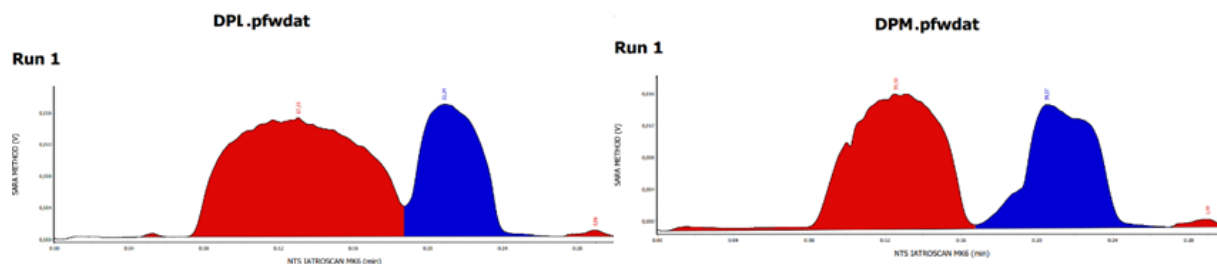
*Grafica curvas de destilación DPL, DPM, DPP y DAO*



De la misma manera, se realizó la comparación del análisis SARA del DPP con los de los DPL y DPM, los cuales se ilustran en las Figuras 8 y 9; es importante aclarar que no fue posible realizar el comparativo con el DAO debido a que este producto hace tiempo no se produce y no existe histórico de análisis SARA. Así como los valores de la destilación simulada del DPP son cercanos al DPM, los resultados de los análisis SARA revelan un alto contenido de compuestos saturados y aromáticos, y baja presencia de resinas y asfáltenos en el DPP, lo cual supone un comportamiento similar en la operación de la U-1200 MEC al momento de procesar esta carga al compararla con el DPM.

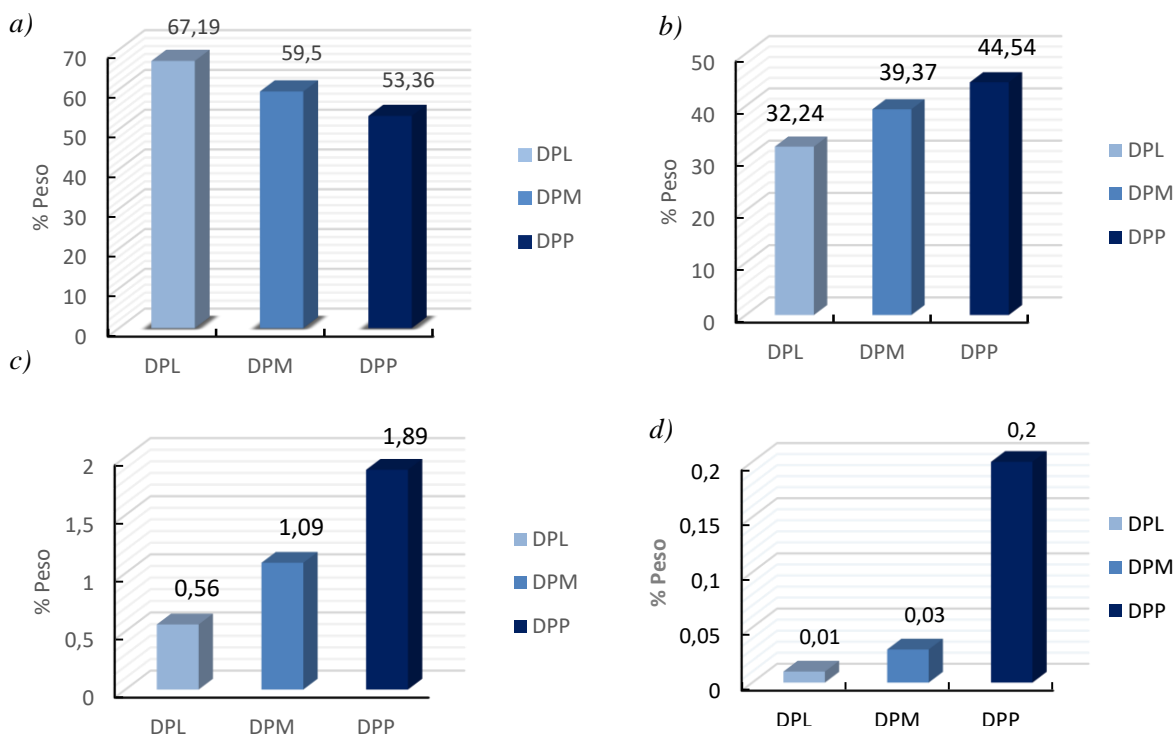
**Figura 8.**

*Resultados análisis SARA de los DPL y DPM.*



**Figura 9.**

*Comparativo de los resultados SARA del DPL, DPM y DPP. a) Saturados, b) Aromáticos, c) Resinas, d) Asfáltenos.*



### 5.1.2 Resultados corridas planta piloto U-4100

**5.1.2.1 Balance masico y caracterización de productos.** Para obtener los contenidos de cera, desparafinado, repulpa y residual presentes en la carga, fue necesario tomar cada muestra recolectada al final de cada corrida y separar la cantidad de solvente presente en cada una, como se muestra en las Figuras 10 y 11.

#### Figura 10.

*Proceso de separación de la cera del solvente en laboratorio.*



**Figura 11.**

*Proceso de separación del solvente del aceite (Desparafinado, Repulpa, Residual).*



En la Tabla 7 se presentan los balances y velocidades de filtración obtenidas durante las pruebas en planta piloto. Los rendimientos de las corrientes obtenidas de cada corrida fueron calculados partiendo de la base de que los 210g de muestra inicial son el 100% de la masa, luego cada corriente fue pesada por separado para poder determinar los rendimientos en % peso de cada una.

**Tabla 7.***Balance masico y velocidades de filtración corridas de prueba planta piloto.*

No. CORRIDA	C-01	C-02	C-03	C-04	C-05	C-06	C-07	C-08	C-09	C-10	C-11	C-12	Promedio	Desv. Estándar
<b>RENDIMIENTO</b>														
<b>(%PESO)</b>														
<b>Desparafinado</b>	47%	52%	58%	57%	58%	56%	56%	57%	56%	57%	58%	57%	56%	2,9%
<b>Repulpa</b>	16%	16%	13%	14%	13%	14%	15%	13%	15%	14%	13%	15%	14%	1,1%
<b>Aceite residual</b>	6,0%	5,8%	5,1%	5,3%	6,0%	5,5%	5,9%	5,8%	5,4%	5,2%	6,0%	5,5%	6%	0,3%
<b>Cera dura</b>	30%	26%	24%	24%	23%	24%	23%	24%	24%	24%	23%	23%	24%	2,0%
<b>Total</b>	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0,0%
<b>VELOCIDAD</b>														
<b>DE</b>														
<b>FILTRACIÓN</b>														
<b>VEL. 1ra.</b>	2	2	3	4	3	3	4	4	3	3	3	4	3	0,62
<b>FILTRACIÓN</b>														
<b>(ml/s)</b>														
<b>Lavado (ml/s)</b>	2	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	0,42

No. CORRIDA	C-01	C-02	C-03	C-04	C-05	C-06	C-07	C-08	C-09	C-10	C-11	C-12	Promedio	Desv. Estándar
<b>RENDIMIENTO</b>														
<b>(%PESO)</b>														
<b>VEL. 2da.</b>	3	4	2	4	5	3	4	4	4	2	4	4	4	0,82
<b>FILTRACION</b>														
<b>(ml/s)</b>														
<b>Lavado (ml/s)</b>	6	2	1	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1,15
<b>VEL. 3ra.</b>	3	3	4	5	4	3	4	4	6	4	4	3	4	0,83
<b>FILTRACIÓN</b>														
<b>(ml/s)</b>														
<b>Lavado (ml/s)</b>	2	2	2	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	0,46

De la información consignada en la Tabla 7 se destaca que los rendimientos de cera y aceite desparafinados se encuentran cercanos a los valores típicos establecidos para un destilado parafínico medio DPM, los cuales se pueden apreciar en la Tabla 2. Sin embargo, el porcentaje de repulpa, según la base de datos de la planta piloto de corridas, supone que la carga puede ser procesada con condiciones operacionales para una carga tipo DAO. Esto último será objeto de estudio para próximos trabajos de aplicación. De igual manera, las velocidades de filtración en cada una de las tres etapas no superan el valor de 4ml/s, lo cual es favorable para la separación del aceite de la cera.

Así mismo, se puede indicar que el contenido de cera presente en el DPP podría ser aprovechado, si se realiza *blending* con el DPM. Esta estrategia podría ser evaluada en futuras pruebas en la planta piloto U-4100.

Las muestras de cera y aceite desparafinado obtenidas en las corridas se les practicaron los análisis de laboratorio respectivos para su caracterización los cuales se ilustran en la Tabla 8.

**Tabla 8.***Caracterización del aceite desparafinado y la cera desaceitada pesada.*

<b>CARGA – DPP</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
<b>CARACTERÍSTICAS – PRODUCTOS</b>		
<b>CERA PESADA DESACEITADA</b>		
<b>Contenido de Aceite D 721 (%Peso)</b>	0,74	g/100g
<b>Punto de Fusión</b>	63,1	°C
<b>Penetración</b>	9	mm/10
<b>Color</b>	<-16	N/A
<b>ACEITE DESPARAFINADO PESADO</b>		
<b>Punto de Fluidez D97 (°C)</b>	-6	°C
<b>Viscosidad cinemática a 100°C</b>	9,459	mm <sup>2</sup> /s
<b>Viscosidad cinemática a 40°C</b>	109,2	mm <sup>2</sup> /s
<b>Índice de viscosidad</b>	43	N/A
<b>Gravedad °API</b>	19,1	Grados API
<b>Destilación</b>		
<b>PIB</b>	305,2	°C
<b>5%</b>	345,3	°C
<b>10%</b>	377,1	°C
<b>20%</b>	417,1	°C
<b>30%</b>	431,8	°C
<b>40%</b>	443,0	°C
<b>50%</b>	452,4	°C
<b>60%</b>	463,0	°C
<b>70%</b>	473,7	°C
<b>80%</b>	487,4	°C
<b>90%</b>	502,8	°C

<b>CARGA – DPP</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
<b>95%</b>	514,6	°C
<b>PEB</b>	539,6	°C
<b>Composición</b>		
<b>Saturados</b>	47,13	%
<b>Aromáticos</b>	49,19	%
<b>Resinas</b>	3,65	%
<b>Asfáltenos</b>	0,03	%

De la información consignada en la Tabla 8 se puede establecer que las características físicas tanto de la cera como del aceite desparafinado son muy similares a las arrojadas con corridas de DPM. De la cera es necesario hacer énfasis en el parámetro del color, ya que este es un aspecto que podría ser difícil de mejorar en la unidad de hidrotreatmento con hidrógeno por ser tan oscura y que podría afectar la vida útil del actual catalizador del R-1121. Con el aceite desparafinado se debe resaltar que cumple con los parámetros de calidad requeridos para la U-700, en donde serán sometidos al proceso de extracción líquido-líquido con Fenol. Se debe Tener en cuenta que el contenido de compuestos aromáticos y saturados también cumplen con las especificaciones necesarias para este proceso. El recobrado del 5% del desparafinado procedente del DPP, dio como resultado 345,3 °C y el mínimo requerido es de 375°C. Por heurística se tiene certeza de que este valor de la destilación es un indicador de la presencia de compuestos livianos en el DPP, por lo cual se hace necesario incrementar el consumo de solvente durante este proceso. Sin embargo, los autores dejan la opción de profundización para estudios a futuro.

De igual manera, llegado a este punto y teniendo en cuenta los resultados de los análisis de laboratorio ilustrados en la Tabla 8, es prudente afirmar que el aceite desparafinado obtenido del DPP no es apto para la producción de una nueva base lubricante parafínica pesada, ya que los

valores de los parámetros de viscosidad cinemática a 100°C, Índice de viscosidad y destilación, son similares y muy cercanos a los de un desparafinado medio.

## 5.2 Análisis técnico de la corrida con DPP a nivel industrial en la U-1200 MEC

En la Tabla 9 se ilustran las variables operacionales de la U-1200 MEC, a las cuales se somete la carga de DPM durante una operación estándar y que determinan el rendimiento y la calidad del desparafinado. Estas variables fueron extraídas del paquete de tecnología de proceso de la U-1200 MEC consignadas en el manual de descripción de la unidad (MDU).

**Tabla 9.**

*Variables típicas operacionales de la U-1200 para una corrida con DPM*

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
<b>Fujo de carga</b>	165	BPH
	<b>Relación S/C</b>	<b>Temperatura</b>
<b>Dilución 1</b>	0,8	50 °C
<b>Dilución 2</b>	0,5	18,3 °C
<b>Dilución 3</b>	1,05	10 °C
<b>Dilución 4</b>	1,1	-6,6 °C
<b>Dilución 5</b>	0,56	-10,5 °C
<b>TOTAL S/C</b>	4	
<b>ETAPA</b>		-20 °C
<b>DESPARAFINADO</b>		
<b>Lavado torta</b>	0,8	-20 °C
<b>Solvente de dilución</b>	2,3	-12 °C

PARÁMETRO	CANTIDAD	UNIDAD
<b>ETAPA REPULPA</b>		
	-12	°C
<b>Lavado torta</b>	0,8	-12
<b>Solvente de dilución</b>	1,9	12,7
<b>ETAPA DESACEITADO</b>		
	12,7	°C
<b>Lavado torta</b>	0,8	12,7
<b>Concentración MEC-</b>		50% - 50%
<b>Tolueno</b>		

De tal manera, se puede analizar que las condiciones operacionales de la U-1200 MEC, son las mismas que se emplearon en la U-4100 Planta piloto de desparafinado de bases lubricantes ilustradas en la Tabla 4. Existen diferencias importantes que deberán ser tenidas en cuenta al momento de escalar el piloto a nivel industrial, debido a los esquemas operacionales empleados en ambas plantas. En la U-4100 el tipo de corrida es por Batch y en la U-1200 MEC es continua. El escalado a nivel industrial de los flujos de las diluciones y los lavados, se realiza al utilizar los valores de las relaciones S/C. Es necesario hacer énfasis en aspectos relevantes de la operación en el modo continuo, tales como los regímenes de flujo, el área de filtración, las áreas de contacto en las operaciones de despojo y transferencia de calor, que no se aplican en la escala piloto y que influyen significativamente en los fenómenos de transferencia de masa y energía, que determinarán en la mayoría de los casos, los rendimientos, la calidad de los productos y los volúmenes de solvente recuperados.

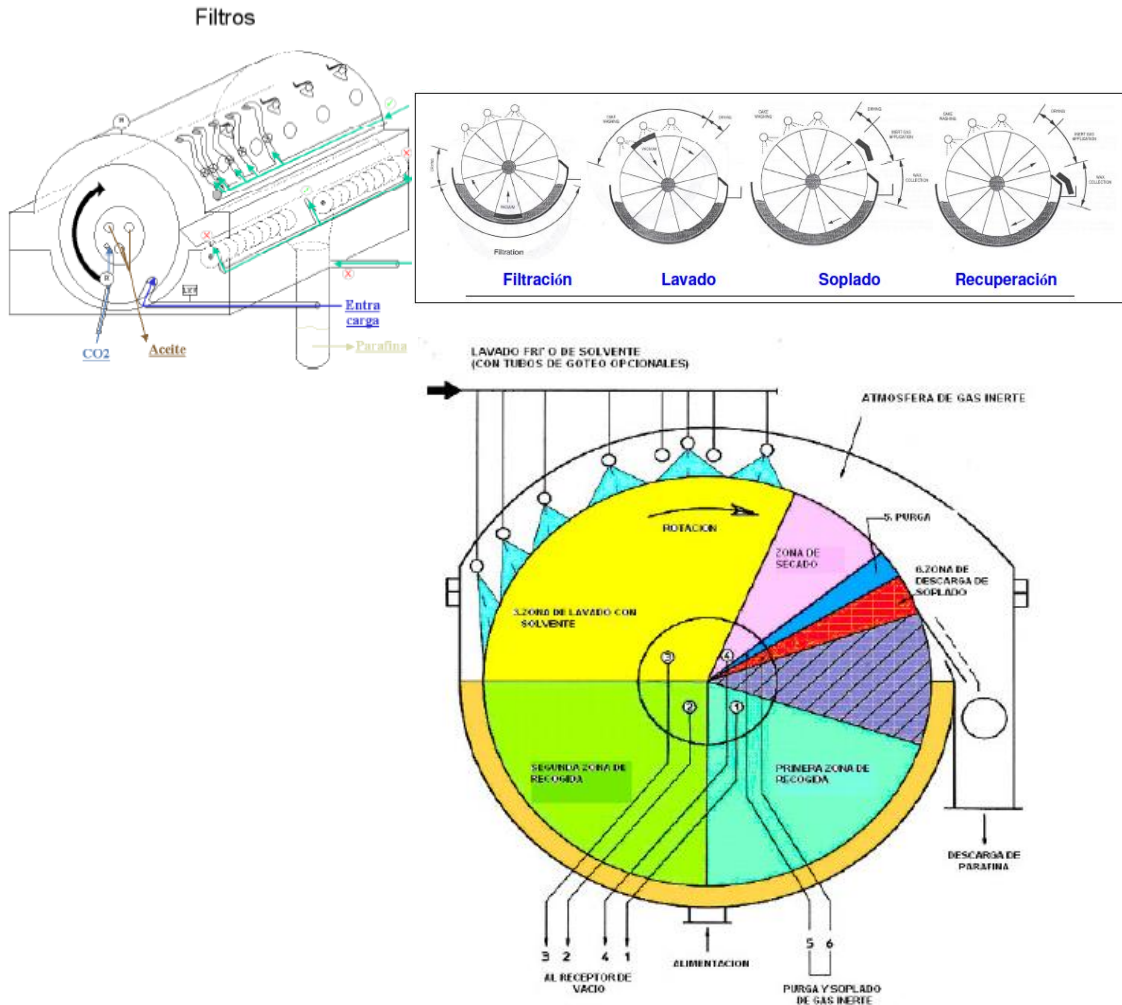
Para evitar las pérdidas por transferencia de energía con el ambiente, la U-1200 está provista con líneas de proceso equipadas con revestimiento térmico, un sistema refrigerante robusto que emplea propileno para tal propósito, sistemas de control automatizados e intercambiadores de calor, que garantizan una transferencia adecuada de la energía, asegurando la

rampa de enfriamiento requerida desde los 50°C hasta los -20°C para garantizar que la viscosidad del fluido se mantenga dentro del rango de diseño 2 a 3 cp. Estos aspectos no representan dificultad alguna debido a que los equipos de la U-1200 permiten escalar las condiciones empleadas en la planta piloto. Sin embargo, el aspecto más relevante en el escalado a nivel industrial se presenta en la operación de los filtros rotativos. Ya que, es en estos equipos donde se obtienen los rendimientos y la calidad deseada tanto del aceite desparafinado, como de la cera. Por ende, es necesario asegurar las condiciones operacionales de los mismos y que el licenciador cita en el MDU “Las variables de control de la filtración están representadas por la velocidad de filtración, la presión diferencial del filtro, el nivel de la suspensión en el tanque, el solvente de lavado y los rangos de caudal de gas de soplado. Estas condiciones hacen parte del análisis que el operador de filtros debe realizar frecuentemente durante su operación, haciendo una secuencia de pruebas hasta llegar al punto en que se obtenga: el mejor rendimiento de aceite desparafinado, el máximo régimen de flujo de alimentación (Máxima carga) y el mínimo contenido de aceite en la parafina”.

Para una mejor comprensión de la operación de un filtro rotativo se ilustra un esquema del mismo en la Figura 12 junto con su ciclo de operación. De igual manera, mediante las Ecuaciones 1 y 2 se puede determinar el rendimiento del filtro y la operación de filtrado, las cuales deberán ser tenidas en cuenta al momento de escalar a nivel industrial.

**Figura 12.**

*Esquema de un filtro rotativo y su ciclo de operación.*



**Ecuación 1.** Rendimiento del filtro

$$V_c = K * D * L * \sqrt{\left(N * S * \frac{\Delta P}{R_g}\right)}$$

De donde:

$V_c$ : flujo a través del filtro

$N$ : velocidad de rotación del tambor (rpm)

$S$ : ángulo correspondiente a la parte sumergida del tambor (radianes,  $\pi$ )

$D$ : diámetro del tambor

$L$ : longitud del tambor

$K$ : constante dependiente del medio filtrante y el tipo de filtro

$R_g$ : resistencia de la torta

### **Ecuación 2. Operación de filtrado**

$$\frac{d_v}{d_t} = \frac{P * A^2}{\mu * (r * c * V * R_m * A)}$$

De donde:

**$P$ : presión**

**$V$ : volumen de filtrado**

**$t$ : tiempo**

**$A$ : área**

**$c$ : peso de sólidos en la torta unidad de volumen de filtrados**

**$r$ : resistencia específica de la torta**

**$R_m$ : resistencia del medio filtrante**

**$\mu$ : viscosidad del filtrado**

Es necesario indicar que para poder emplear las Ecuaciones 1 y 2 a nivel industrial, es imperante determinar el parámetro de la resistencia de la torta. Este dato puede ser calculado a partir de la curva de volumen de filtrado en función del tiempo, para posteriormente obtener la pendiente que está representada por la expresión  $\frac{d_v}{d_t}$  en la Ecuación 2. De igual manera, se aclara que este parámetro no fue calculado por los autores del presente proyecto, debido a limitaciones técnicas para la obtención de la curva de filtración.

### 5.3 Evaluación del impacto económico

Para la evaluación del impacto económico se analizaron los costos operacionales - OPEX de los departamentos de refinación de crudos y parafinas los cuales fueron suministrados por el departamento de planeación de la producción y que se pueden apreciar en la Tabla 10.

**Tabla 10.**

*OPEX de los departamentos de Refinación de crudos y Parafinas para el año 2022.*

DEPARTAMENTOS	CRUDOS	PARAFINAS
COSTOS FIJOS, MM\$	PLAN	PLAN
<b>Costos Fijos</b>	102	37,4
<b>Mantenimiento Dia a Dia</b>	19,2	10,8
<b>Soporte Administrativo Interno</b>	37,1	10,3
<b>Laborales</b>	16,1	8,2
<b>Regionales</b>	6,0	2,7
<b>Soporte Ambiental</b>	13,7	2,3

DEPARTAMENTOS	CRUDOS	PARAFINAS
Otros Costos Fijos	9,4	3,1
Materiales y Suministros	0,7	0,3
Servicios Contratados	0,5	0,0
Costos Generales	8,2	2,9
Costos de Proyectos	-	0,0
Costo Depreciación	113	23,6
Depreciación y amortización	112,6	23,6
Otros Costos Variables	123	24,3
Materiales de Proceso	10,8	6,2
Servicios industriales	60,2	15,0
Gas	51,8	3,0
<b>TOTAL</b>	<b>337</b>	<b>85</b>

De la Tabla 10 se destaca que los costos operacionales por concepto de materiales y suministros son los que están asociados a la materia prima 0.3MM\$ (Miles de millones de pesos colombianos) del Departamento de Parafinas y Fenol, pues son estos los que variarán al momento de incluir el DPP como materia prima para su proceso.

Seguidamente, se analizaron los CAPEX en los que incurrirá el Departamento de parafinas para transportar el DPP desde la U-130 hasta el tanque K-1275 ubicado en el área de almacenamiento de Parafinas y Fenol; para esto se plantearon dos alternativas que consisten en:

- **Alternativa 1:** Construcción de una línea nueva para el envío del DPP desde la U-130 hasta el K-1275 de Parafinas.

- **Alternativa 2:** Inspección y recuperación de la línea existente para el envío del DPP desde la U-130 hacia Parafinas.

En la Figura 13 se aprecia el trayecto de la línea requerida para transportar el DPP desde la U-130 hasta el K-1275.

**Figura 13.**

*Vista superior del trayecto de línea de DPP desde la U-130 hasta el K-1275*



Para el cálculo de la distancia del tramo de tubería se empleó la herramienta Google Maps, la cual garantiza un margen de precisión de  $\pm 20\text{m}$ , arrojando una distancia de 530m. Los costos de capital CAPEX fueron suministrados por la coordinación de integridad de equipos CIE en asocio con el departamento de planeación de la Refinería de Barrancabermeja. Cada una de las alternativas se ofertaron a dos empresas aliadas especialistas en este tipo de contratos y que actualmente prestan sus servicios a Ecopetrol S.A; en la Tabla 11 se puede apreciar el costo de

construir la línea nueva suministrado por cada empresa.

**Tabla 11.**

*CAPEX alternativa N°1.*

ESTIMACION DEL COSTO DE LA ORDEN DE SERVICIO	Contratista 1	Contratista 2
DE MANTENIMIENTO (COSM)		
<i>CMODPU + CMODN + CMODJ + CFCIN + CMOIPU + CHE</i>	\$	\$ 714.385.067
<i>+ COS + CTS</i>	844.315.626	
<b>Administración %</b>	11,00%	12,00%
Vlr. Administración	\$	\$ 85.726.208
	92.874.719	
<b>Utilidad %</b>	5,00%	6,00%
Vlr. Utilidad	\$	\$ 42.863.104
	42.215.781	
<i>Total COSM (\$Col):</i>	\$	\$ 842.974.379
	979.406.126	
<i>*Total COSM (\$US):</i>	\$ 224.377	\$ 193.121

\*\$1US=4365\$Col según TRM 12-09-2022

La alternativa N°2 se plantea debido a que existe una línea que realiza el recorrido desde los límites de batería de la U150 hasta los tanques de almacenamiento del área de Parafinas. Esta tubería fue utilizada para transportar destilado Nafténico Pesado, el cual se dejó de producir en el año 2007 por desabastecimiento de crudos nafténicos a la Refinería de Barrancabermeja. Para los CAPEX asociados a la alternativa N°2 que involucra recuperar la línea existente, Ecopetrol S.A realiza inicialmente una inspección general de la línea, para determinar la cantidad de tramo de tubería que debe ser reemplazada, y si este es mayor al 40% del total de la línea, se elige la

alternativa N°1 como mejor opción. En caso de que el porcentaje de línea sea  $\leq 40\%$  su valor será igual al mismo porcentaje del costo total de la Opción N°1.

Paso seguido, se realizó la proyección de la producción de barriles de base lubricante por año, teniendo en cuenta los flujos de producción de destilado parafínico pesado y los rendimientos arrojados en las corridas en la planta piloto, junto con los rendimientos teóricos de los procesos de extracción líquido - líquido de la planta con Fenol U-700 y del hidrotratamiento de la U-1110, los cuales se ilustran en la Tabla 12.

**Tabla 12.**

*Producción proyectada de barriles de base lubricante a partir del DPP.*

PRODUCCION			Rendimiento	Rendimiento de	Rendimiento de	Precio de la
BARRILES DE DPP			de la U-1200	la U-700	la U-1110	BEPM \$US/BI
*BP	**BPM	***BPA	Desparafinado	Rafinado Pesado	Base Parafinica	\$130Us/BB1
D			Pesado (BPA)	(BPA)	pesada (BPA)	
850	25500	306000	171360	59976	56977	\$ 6.837.264
BPD	Barriles por día		** BPM	Barriles por mes		***BPA Barriles por año

De la Tabla 12 se puede establecer, que si se empleara el DPP como carga en la U-1200 se podría producir aproximadamente un 30% más de base parafínica media al mes, teniendo en cuenta que el 100% son 16000BB1/mes. Para el cálculo de los indicadores económicos VPN y TIR se tuvo en cuenta la opción N°1, es decir, los costos de construir la línea nueva para el transporte del DPP. También se tuvieron en cuenta el costo del destilado y del gasóleo \$106US/BB1, el costo de la base lubricante media \$130US/BB1 y la tasa de retorno esperada para los proyectos en Ecopetrol que es del 10% anual. Todo esto se calculó para un periodo de 3 años, debido a que en los 2

primeros años no se alcanza el punto de equilibrio; en la Tabla 13 se aprecian los resultados de los indicadores.

**Tabla 13.**

*Resultados de los Indicadores Financieros*

INDICADOR	CANTIDAD
VPN	\$ 1.744.495
VAN	\$ 153.019
VFN	\$ 1.918.944
B/C	1,06
TIR	32%

De la Tabla 13 se puede apreciar que el VPN y el VAN son positivos, por lo cual, a este nivel de análisis indica un potencial de viabilidad financiera para que el Departamento de Parafinas y Fenol realice la inversión para poder transportar, almacenar y procesar el DPP en sus instalaciones. Así mismo, la TIR es superior al 10% que es la tasa de retorno esperada por Ecopetrol en sus proyectos, lo cual indica de manera preliminar la rentabilidad y viabilidad del proyecto, sumado al factor beneficio costo B/C que nos indica que por cada dólar que se invierta se ganará 1,06 dólares.

Es necesario aclarar que, de contemplarse la viabilidad de ejecutar el presente proyecto, los resultados de los indicadores financieros están sujetos a revisión previa por parte del personal de planeación de Ecopetrol S.A.

## 6. Conclusiones

Se realizaron corridas de prueba en la planta piloto de desparafinado de bases lubricantes, de las cuales se pudo determinar, que si se empleara el destilado parafínico pesado DPP como carga a la U-1200 MEC del Departamento de Parafinas y Fenol, se puede alcanzar un rendimiento promedio de 56% de aceite desparafinado, con características fisicoquímicas aprovechables para la producción de base lubricante parafínica media. Siendo la viscosidad a 100°C (9,459 mm<sup>2</sup>/s), viscosidad a 40°C (109,2 mm<sup>2</sup>/s), índice de viscosidad (43), fluidez (-6 °C) y rango de destilación, las características más relevantes.

Se realizó el análisis técnico considerando las condiciones de una corrida a nivel industrial. De allí se identificó que es posible llevar a cabo corridas en la U-1200 MEC empleando el DPP como carga para la misma. De igual manera, se identificó que la etapa de filtrado es una de las más importantes al momento de realizar el escalado y que para asegurar los resultados de la misma se debe calcular la resistencia de la torta mediante el procedimiento mencionado en la sesión de resultados.

Se evaluó el impacto económico de los indicadores financieros obtenidos TIR (32%) y VPN (\$1.744.495) a nivel preliminar. Los cuales revelan que para el departamento de Parafinas y Fenol el emplear el DPP como carga para la U-1200 MEC le representaría una oportunidad de negocio, al mostrar un potencial aumento en su margen económico, proyectando un incremento en la producción de base lubricante parafínica media en un 30% mensual.

## 7. Recomendaciones

Los autores recomiendan realizar *blending* entre el DPP y el DPM para aprovechar la cera presente en el DPP e incrementar el margen económico del Departamento de Parafinas y Fenol, realizando corridas de prueba en la planta piloto y analizando los resultados y las muestras de cada producto y subproducto obtenidos.

Realizar corridas de prueba en planta piloto, con condiciones operacionales para una carga tipo DAO y evaluar los rendimientos de aceite desparafinado y cera presentes en el DPP bajo estas condiciones.

Realizar estudios para el aprovechamiento de la cera obtenida del DPP, que permitan hidrogenarla en la U-1120, sin afectar la vida útil del catalizador del reactor R-1121.

Determinar la resistencia de la torta en la etapa de filtración mediante pruebas en planta piloto, realizando mediciones de flujo volumétrico de filtrado y empleando la Ecuación 2.

Profundizar en el cálculo de los indicadores financieros del estudio realizado, incluyendo todas las variables que exige Ecopetrol S.A para la ejecución de sus proyectos, mediante el cual se asegure la rentabilidad de la inversión.

### Referencias Bibliográficas

- Al Nagar A, El Shamy (2007) Base oil production. Part II: Dewaxing, finishing, and blending  
EPetroleum Science and Technology.  
Centro de información técnico de la GRB.
- David R. Anderson, D. J. (2008). Estadística para administración y economía. Santa Fe (México):  
CENGAGE Learning.
- Ecopetrol S.A. (2000). Manual de Operaciones CDU U-130. Barrancabermeja.
- Ecopetrol S.A. (2000). Manual de Operaciones U-1200 MEC. Barrancabermeja.
- Instituto Colombiano del Petróleo - ICP (2000). Manual de operaciones planta piloto unidad de  
desparafinado. Pie de Cuesta.
- Levine, I. N. (2002). Fisicoquímica. Madrid-España: Mc Graw-Hill.
- McCabe, W. L. (1991). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Madrid: Mc Graw-  
Hill.
- Montgomery, D. C. (2005). DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS. Limusa Wiley.
- Normas ASTM. (s.f.). Norma ASTM D4530.
- Perry, R. H. (1999). Manual del Ingeniero Químico. Mc Graw-Hill.
- Sandro F. Gonzalez G. (2016); Informe corrida de prueba en planta piloto de la unidad de  
desparafinado para el gasóleo hidrogenado (GAOH) y el Fondo de la Torre T-2653 producto  
del mild-hydrocracking de la planta de Unibon (U-2650) de la Refinería de Barrancabermeja.  
Pie de Cuesta.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., & Abbott, M. M. (2005). Introducción a la termodinámica en  
ingeniería química. México: Mc Graw-Hill.

## **Apéndices**

**Apéndice A. Formato toma de datos de operación U-4100**

	<b>FORMATO DATOS DE OPERACIÓN UNIDAD DESPARAFINADO DE BASES LUBRICANTES</b>	13/08/2022
---	---	------------

CARGA					Corrida n°	Fecha:					
Diluciones	Temp. °C	S/C	Solvente (vol)	Tipo Solv	Carga, gr	Desparafinado		Refiltrado		Fraccionamiento	
					Volumen (ml)	Filtración	Lavado	Filtración	Lavado	Filtración	Lavado
Dilución 1					100ml						
Dilución 2					200ml						
Dilución 3					300ml						
Dilución 4					400ml						
Dilución 5					500ml						
S/C TOTAL					600ml						
Desparafinado					700ml						
Lavado					800ml						
Dilución					900ml						
Refiltrado					1000ml						
Lavado					Tiempo Final (seg)						
Dilución					Tiempo Total (seg)						
Fraccionamiento					Velocidad (ml/seg)						
Lavado											

Observaciones   	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Balance de masa</th> <th>Peso,gr</th> <th>%</th> <th>%Normal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Aceite desparafinado</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Repulpa</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Cera</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Aceite residual</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Perdidas</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td><b>Total</b></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Balance de masa	Peso,gr	%	%Normal	Aceite desparafinado				Repulpa				Cera				Aceite residual				Perdidas				<b>Total</b>			
Balance de masa	Peso,gr	%	%Normal																										
Aceite desparafinado																													
Repulpa																													
Cera																													
Aceite residual																													
Perdidas																													
<b>Total</b>																													

ICP-UST-F-006002	REVISION: 02
------------------	--------------

Apéndice B. Plano unidad de desparafinado de bases lubricantes U-4100

