

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PARA LA PRODUCCIÓN DE  
LUBRICANTE INDUSTRIAL ISO 32 E ISO 68 EN LA GRB**

**HENRY GARCÉS LÁZARO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PARA LA PRODUCCIÓN DE  
LUBRICANTE INDUSTRIAL ISO 32 E ISO 68 EN LA GRB**

**HENRY GARCÉS LÁZARO**

**Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Química**

**Director:**

**FERNANDO VIEJO ABRANTE,  
Ph. D en Corrosión y Protección de Materiales Metálicos**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

## DEDICATORIA

A mi esposa Claudia y mis hijas quien en todo momento me apoyó y motivaron en momentos difíciles y que supieron ser pacientes ante mi ausencia durante el periodo académico.

Al Ingeniero Orlan Díaz, Ernesto Gómez, Carlos González, Ángela Corrales quienes creyeron en mí y me dieron la oportunidad de continuar con el mejoramiento de mis competencias técnicas.

A todos aquellos quienes me han apoyado en este proceso y creen que este proyecto dará mayor valor agregado a nuestra Empresa (Darío Iván Duarte, Albeiro Alarcón, Sandro Farut).

A mi director de proyecto Dr. Fernando Viejo, quien me oriento y apoyo en el desarrollo de este trabajo de aplicación.

A los profesores que me transmitieron el conocimiento en esta maestría.

***Henry Garcés Lázaro***

## **AGRADECIMIENTOS**

A los compañeros de la maestría, que durante este periodo fortalecimos lazos de amistad, a mis padres, hermanos y amigos.

Al Ingeniero Darío Duarte, Albeiro Alarcón, Sandro Farut, Eduard Palomino, quienes forman parte del equipo para la producción de lubricantes marca ECOPETROL.

A mi Director Fernando Viejo con quien emprendí este viaje proyecto de grado.

A Ecopetrol por brindarme la oportunidad de estudiar.

A Camila quien en todo momento nos brindó su apoyo con la logística de la maestría.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	21
<b>1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE</b>	23
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS CRUDOS SELECCIONADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BASES LUBRICANTES.	25
1.2 ETAPAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA BASE LUBRICANTE.	26
1.2.1 Proceso de Refinación.	26
1.2.2 Etapa de Desparafinado	30
1.3 LAS BASES LUBRICANTES	37
1.3.1 Clasificación	37
1.3.1.1 Base Lubricante tipo I	38
1.3.1.2 Base Lubricante tipo II	38
1.3.1.3 Base Lubricante tipo III	39
1.3.1.4 Base Lubricante tipo IV	39
1.3.1.5 Base Lubricante tipo V	40
1.3.2 Análisis físico-químicos para determinar la calidad de las bases lubricantes.	40
1.3.2.1 Color (ASTM D-1500) y fluorescencia	42
1.3.2.2 Corrosión en cinta de cobre (ASTM D-130)	43
1.3.2.3 Contenido de agua y sedimento (ASTM D 96)	43

1.3.2.4 Viscosidad cinemática a 100°C (212°F) (ASTM D445-14E2) y Viscosidad a 40°C (104°F) (ASTM D445-14E2)	43
1.3.2.5 Índice de viscosidad (IV) (ASTM D 2270)	44
1.3.2.6 Número de neutralización (NN) (ASTM D-664-11A)	47
1.3.2.7 Punto de fluidez (ASTM D-97)	48
1.3.2.8 Punto de inflamación (ASTM D-92-12B)	48
1.3.2.9 Residuo carbón Conradson (ASTM D 4530-11)	49
1.3.2.10 Tiempo de separación de la emulsión (ASTM D-1401-12)	49
1.3.2.11 Cenizas (ASTM 482)	50
1.3.2.12 Densidad (ASTM D 4052-11)	50
1.3.2.13 Gravedad API (ASTM D 4052-11)	50
1.3.2.14 Azufre (ASTM D 4294)	52
1.4 LUBRICANTES	52
1.4.1 Clasificación de los lubricantes	52
1.4.2 Los aditivos	57
1.4.2.1 Aditivos que modifican las propiedades de los lubricantes	58
1.4.2.2 Aditivos que protegen al lubricante	59
1.4.2.3 Aditivos que protegen a las superficies de trabajo	59
1.4.3 Controles de calidad de los lubricantes industriales.	61
1.4.3.1 Punto de combustión (ASTM D-92):	61
1.4.3.2 Punto de anilina (Método ASTM D611):	62
1.4.3.3 Estabilidad a la oxidación (Método ASTM D943):	62
1.4.3.4 Emulsibilidad (ASTM D-1601) y formación de espuma (ASTM D-892):	62

1.4.3.5 Aeroemulsión:	63
1.4.3.6 Tensión interfacial (ASTM D-971):	63
1.4.3.7 Punto de Nube (ASTM D-25000):	64
1.4.3.8 Viscosidad:	64
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>66</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL.	66
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	66
<b>3. DISEÑO METODOLÓGICO</b>	<b>67</b>
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	68
3.2 ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BASES LUBRICANTES.	68
3.2.1 Análisis de variabilidad de la calidad de bases lubricantes con respecto a las características de la carga y parámetros críticos de calidad.	68
3.2.2 Análisis RCA y modelamiento de unidades de procesos de producción de bases lubricantes	69
3.2.3 Recopilación de información para análisis y desarrollo de simulación.	69
3.2.4 Desarrollo de la simulación de los procesos	70
3.2.4.1 Selección de los paquetes termodinámicos.	70
3.2.4.2 Simulación de la unidad de refinación de crudo parafínico (CDU)	73
3.2.4.3 Simulación de la planta de extracción de ceras utilizando tolueno y MEK	73
3.2.4.4 Simulación de la planta de extracción de bases lubricantes utilizando fenol	75
3.2.4.5 Simulación de la unidad de Hidrotratamiento de bases lubricantes	75
3.3 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BASES LUBRICANTES	79

3.3.1 Síntesis y caracterización de los lubricantes	79
3.3.2 Generación y análisis de alternativas de diseño de una planta de producción de lubricantes	79
3.3.3 Recomendaciones y acciones a implementar	80
3.3.4 Definición de equipos de laboratorio para la caracterización de los lubricantes	80
<b>4. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>81</b>
4.1 ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BASES LUBRICANTES.	81
4.1.1 Análisis de variabilidad de la calidad de bases lubricantes con respecto a las características de la carga y parámetros críticos de calidad	81
4.2 ANÁLISIS RCA Y MODELAMIENTO DE UNIDADES DE PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE BASES LUBRICANTES	87
4.2.1 Unidad de Destilación de Crudo	87
4.2.2 Unidad de hidrot ratamiento de bases lubricantes	91
4.2.3 Unidad de extracción líquido-líquido con fenol	94
4.2.4 Unidad de desparafinado con solvente MEK/tolueno	102
4.3 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE LUBRICANTES	111
4.3.1 Síntesis y caracterización de los lubricantes	111
4.3.2 Generación Y Análisis De Alternativas De Diseño De Una Planta De Producción De Lubricantes	113
4.3.3 Identificación de necesidades, recursos y equipos necesarios para el diseño conceptual de la planta de lubricantes	114
4.3.4 Inventario de equipos y recursos disponibles dentro en el Departamento de Parafinas y Fenol para la construcción de la Planta de Producción de Lubricantes.	116
4.3.5 Requerimientos adicionales	118
4.3.6 Análisis Técnico. Cálculo hidráulico de la tubería requerida	119
4.3.7 Análisis económico. Selección del aditivo	123
4.3.8 Cálculos para estimar el costo de la inyección de aditivo	124
4.3.9 Definición de equipos de laboratorio para la caracterización de los lubricantes	131

<b>5. CONCLUSIONES</b>	137
<b>6. RECOMENDACIONES</b>	139
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	142
<b>ANEXOS</b>	146

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Estructura molecular de crudos parafínicos.	24
Figura 2. Esquema de Refinación de crudos en la Unidad U150 de la GRB.	28
Figura 3. Esquema básico del proceso de obtención de bases lubricantes en el Departamento de Parafinas y Fenol de la GRB.	29
Figura 4: Esquema de una unidad de desparafinado con solvente.	31
Figura 5. Esquema de una Unidad de extracción Líquido-Líquido.	34
Figura 6. Esquema de una Unidad de Hidrotratamiento de Bases Lubricantes.	35
Figura 7. Reacciones químicas que ocurren en la hidrogenación de las bases lubricantes.	36
Figura 8. Variación de la viscosidad con el aumento de temperatura en tres lubricantes de diferentes índices de viscosidad.	44
Figura 9. Diferentes muestras de aceite lubricante que muestran la habilidad de separar agua.	49
Figura 10: Esquema metodológico.	67
Figura 11. Flujograma para selección de paquete termodinámico.	72
Figura 12. Simulación de la unidad de destilación de crudo parafínico.	74
Figura 13. Simulación unidad extracción de ceras y producción de Aceite desparafinado usando MEK-Tolueno.	76
Figura 14. Unidad de extracción de lubricantes con Fenol.	77
Figura 15. Unidad de Hidrotratamiento de bases lubricantes para remoción de azufre como H <sub>2</sub> S	78
Figura 16 Densidad de los crudos parafínicos cargados a la GRB.	84
Figura 17: Grados API de los crudos parafínicos cargados a la GRB.	85
Figura 18. Densidad y Grados API de los crudos cargados al tren de producción de bases lubricantes.	86

Figura 19. Temperatura de operación de torre de destilación al vacío GRB, datos Enero a Agosto 2016.	88
Figura 20. Datos de calidad del destilado parafínico Liviano.	89
Figura 21. Datos de calidad del destilado parafínico Medio.	90
Figura 22. Índice de viscosidad (VI) de las bases lubricantes y de los refinatos.	93
Figura 23. Comportamiento de la operación en la sección de recuperación de fenol.	95
Figura 24. Tendencia comportamiento del consumo fenol.	96
Figura 25. Resumen esquemático del RCA realizado en la Unidad de Extracción Líquido-Líquido.	98
Figura 26. Análisis de evaluación térmica de intercambiadores presentes en la sección recuperadora de fenol.	103
Figura 27. Cromatografía de los aceites desparafinados.	104
Figura 28: Esquema del proceso de recobro de aceite desparafinado GRB.	105
Figura 29. Concentración porcentaje en peso de MEK en el solvente empleado en la sección de recobro de la Unidad de desparafinado.	106
Figura 30. Alineación del condensado recomendado para el E-1246.	109
Figura 31. Índice de viscosidad (VI) de los refinatos (abril-Mayo del 2016).	110
Figura 32. Costo consumo de aditivo mejorador de índice de viscosidad (VI).	111
Figura 33. Tanques de almacenamiento K-1289, K-1290 y K-1291 del Departamento de Parafinas y Fenol.	117
Figura 34. Trazado de tubería de 2" en acero al carbón para el transporte de materia prima hasta los tanques de almacenamiento para la preparación de los lubricantes.	119
Figura 35: Equipo multifuncional para el análisis de lubricantes	133
Figura 36. Equipo para análisis de aeroemulsión.	134
Figura 37. Equipo para el análisis de herrumbre en lubricantes.	135
Figura 38. Laboratorio portátil para analizar el estado y desempeño de los lubricantes.	136

Figura 39. Diagrama de flujo de la elaboración de aceites lubricantes dividido por etapas.

141

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Clasificación API de las bases lubricantes.	37
Tabla 2. Características físico-químicas que debe cumplir la base lubricante de origen mineral para grado ISO 32.	40
Tabla 3. Características físico-químicas que debe cumplir la base lubricante de origen mineral para grado ISO 68.	41
Tabla 4. Tabla para el cálculo del índice de viscosidad.	46
Tabla 5. Clasificación de los aceites lubricantes industriales norma ISO 3448. Basado en Viscosidades a 40 <sup>a</sup> C, cSt.	54
Tabla 6. Clasificación de aceites lubricantes para motor. Norma SAEJ300.	55
Tabla 7. Clasificación de aceites lubricantes para engranajes, clasificación AGMA.	56
Tabla 8. Comparación de los grados de viscosidad definidos por los diferentes organismos internacionales que normalizan los lubricantes.	57
Tabla 9. Recomendaciones para selección de modelos termodinámicos.	71
Tabla 10. Resultado de la evaluación de los diferentes crudos de carácter parafínico en las plantas piloto del ICP.	83
Tabla 11. RCA consumo fenol en la Unidad de Extracción Líquido-Líquido.	97
Tabla 12. Recomendaciones con relación al RCA realizado en la Unidad de Extracción Líquido-Líquido.	99
Tabla 13. Resultado de la síntesis de Lubricante ISO 32 e ISO 68.	112
Tabla 14. Cotización paquete de aditivos para la producción de lubricantes ISO 32 e ISO 68	123
Tabla 15. Bases de cálculo alternativa número 1 y alternativa número 2.	128
Tabla 16. Análisis económico alternativa 1 de producción de lubricantes ISO 32 e ISO 68.	129

Tabla 17. Análisis económico alternativa 2 de producción de lubricantes ISO 32 e ISO 68.	130
Tabla 18. Comparación de recuperación de la inversión y tasa de retorno de las alternativas para la elaboración de lubricantes.	131
Tabla 19. Análisis físico-químicos que realiza el Laboratorio Industrial de la GRB a las bases lubricantes.	132

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS A LA UNIDAD DE RECOBRO DE ACEITE DESPARAFINADO (DISEÑO VERSUS CONDICIONES ACTUALES) UTILIZANDO LA HERRAMIENTA PROII-SIMSCI	146
ANEXO B. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS A LA UNIDAD DE RECOBRO DE ACEITE DESPARAFINADO (CASOS DE ESTUDIO) UTILIZANDO LA HERRAMIENTA PROII-SIMSCI	151
ANEXO C. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS A LA UNIDAD DE RECOBRO DE ACEITE DESPARAFINADO (CASOS DE ESTUDIO 55%/MEK-45% TOLUENO) UTILIZANDO LA HERRAMIENTA PROII-SIMSCI	155
ANEXO D. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS A LA UNIDAD DE RECOBRO DE ACEITE DESPARAFINADO (CASOS DE ESTUDIO 40%/MEK-60% TOLUENO) UTILIZANDO LA HERRAMIENTA PROII-SIMSCI	156
ANEXO E. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS A LA UNIDAD DE RECOBRO DE ACEITE DESPARAFINADO (CASOS DE ESTUDIO 50%/MEK-50% TOLUENO) UTILIZANDO LA HERRAMIENTA PROII-SIMSCI	157
ANEXO F: EVALUACIÓN TÉRMICA INTERCAMBIADORES DE CALOR DE LA U700 (FENOL)	162
ANEXO G. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN RESUMEN DEL BALANCE DE CORRIENTES PRODUCTO DE LA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA BASES LUBRICANTE.	171
ANEXO H. RECOMENDACIÓN PARA LA INYECCIÓN DE ADITIVO	175

ANEXO I: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LABORATORIO DE LUBRICANTE ISO68 PREPARADO POR EL LABORATORIO INDUSTRIAL DE LA GRB.	177
ANEXO J: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LABORATORIO DE LUBRICANTE ISO68 COMPRADO POR ECOPETROL.	178
ANEXO K BOMBA DE INYECCIÓN DE ADITIVO.	179
ANEXO L. LINEA DE ENVASADO.	180

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA PARA LA PRODUCCIÓN DE LUBRICANTE INDUSTRIAL ISO 32 E ISO 68 EN LA GRB\*

**AUTORES:** Henry Garcés Lázaro\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Bases Lubricantes, Lubricantes, Parámetros de calidad, GRB (Gerencia Refinería de Barrancabermeja), ISO 3448

### RESUMEN:

Este trabajo está dedicado al análisis de la producción de la materia prima para la elaboración de lubricantes tipo I (también llamadas bases lubricantes de origen mineral o simplemente bases) y al estudio de alternativas de diseño de una planta de lubricantes industriales.

En la producción de las bases se realiza un completo análisis de las diferentes etapas del proceso de producción que se requieren para su obtención (Refinación de crudos, desparafinado con solvente, extracción líquido-líquido e hidrotreatmento) así como las variables operativas que afectan la calidad de las mismas y sus parámetros de control, luego se da una breve introducción a los lubricantes, su clasificación internacional (ISO, SAE y AGMA), y las propiedades determinadas por métodos de ensayo avalados por ASMT. Posteriormente se reseña los aditivos que se requieren para mejorar las propiedades de los lubricantes, aditivos que protegen a los lubricantes y aditivos que protegen la superficie de trabajo donde se aplican los lubricantes.

Para el diseño conceptual de la planta de lubricantes en la cual se sintetizó dos lubricantes (ISO 32 e ISO 68 en el laboratorio Industrial de la GRB), para determinar si las bases que produce ECOPETROL cumplen con las normas internacionales ISO 3448 y análisis técnico y económico para la producción de estas.

Finalmente se emitieron recomendaciones a las desviaciones encontradas en el proceso de producción de bases lubricantes y recomendaciones para la construcción y adquisición de equipos para la construcción de la planta de lubricantes.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química Maestría en Ingeniería Química. Director: Ph. D. Fernando Viejo Abrante.

## ABSTRACT

**TITLE:** CONCEPTUAL DESIGN OF A PLANT FOR THE PRODUCTION OF INDUSTRIAL LUBRICANT ISO 32 AND ISO 68 IN THE GRB \*

**AUTHORS:** Henry Garcés Lázaro\*\*

**KEYWORDS:** Lubricant Bases, Lubricants, Quality Parameters, GRB (Barrancabermeja Refinery Management), ISO 3448

### DESCRIPTION

This work is dedicated to the analysis of the production of the raw material for the production of lubricants type I (also called lubricating bases of mineral origin or simply bases) and to the study of alternatives of design of an industrial lubricants plant.

For the production of the bases, a complete analysis of the different stages of the production process required (crude oil refining, solvent dewaxing, liquid-liquid extraction and hydrotreatment) is carried out as well as the operational variables that affect the quality (ISO, SAE and AGMA), and the properties determined by ASMT test methods. The results of this study are summarized in the following table. Subsequently it outlines the additives that are required to improve the properties of lubricants, additives that protect lubricants and additives that protect the surface of the work surface where the lubricants are applied.

For the conceptual design of the lubricant plant in which two lubricants were synthesized (ISO 32 and ISO 68 in the GRB Industrial Laboratory), to determine if the bases produced by ECOPETROL comply with international standards ISO 3448 and technical analysis and economic for the production of these.

Finally, recommendations were made for the deviations found in the process of production of lubricating bases and recommendations for the construction and acquisition of equipment for the construction of the lubricants plant.

---

\* Project of grade

\*\* Faculty of Engineering Physical Chemical School of Engineering Chemical. Magister in Engineering Chemical Director: Ph. D. Fernando Viejo Abrante.

## INTRODUCCIÓN

El acelerado desarrollo de la industria a nivel mundial han traído consigo grandes beneficios a la humanidad, con estos avances se han construido máquinas y equipos que requieren de un elemento importante en su funcionamiento como son los lubricantes para evitar que las piezas internas de las maquinas tuvieran contacto entre sí. Con la entrada en escena de las maquinas se descubrió que las partes en movimientos por su rozamiento y contacto en sus partes generaba temperaturas y desgastes prematuros de las piezas, por lo que se empezó a buscar alternativas que contribuyeran en la eliminación de estas fallas, fue así como empezó la experimentación con todo tipo de sustancias entre las cuales se utilizaron desde lodos hasta cebo o grasa animal como lubricante, hasta que se descubrió el petróleo y sus derivados en el que se puede encontrar fracciones de destilados que se convierten en bases para la elaboración de lubricantes. A si comenzó una gran industria alrededor de los lubricantes y por el dominio del mercado de estos. Ante los amplios requerimientos de lubricación de los equipos industriales, automotores, aviación, marina, y en el campo militar se hizo necesario regular la calidad de los aceites bases y los lubricantes con el fin de definir sus características y aplicación, mediante normas estandarizadas que las clasificaron y establecieron para metros de calidad para las diferentes usos que requiere la industria en general.

El mercado de los lubricantes es muy atractivo económicamente, dejando altos márgenes de ganancia a sus productores, pero también implica grandes inversiones en el desarrollo de componentes que mejoren su desempeño, teniendo en cuenta que la refinería de Barrancabermeja(GRB) propiedad de ECOPETROL S.A. produce la materia prima para la elaboración de lubricantes y que existe una variedad de oferta de aditivos para mejorar las características de

las bases lubricantes, se identificó una oportunidad para incursionar en este segmento de la economía, inicialmente elaborando un lubricante de tipo industrial que sería utilizado en el Departamento de Parafinas y Fenol de la GRB para ir adquiriendo experiencia en su elaboración y evaluar el desempeño de su aplicación, como primera fase, e otra etapa se irá ampliando la oferta a las demás unidades de la Refinaría y luego en un futuro próximo a las de más gerencias de ECOPETROL S.A. e incursionar en el mercado nacional e internacional, en este sentido este trabajo de aplicación trata de una ingeniería conceptual para la producción de lubricante industrial de calidad ISO 68 y está dividido en 6 capítulos donde se explica la elaboración de las bases lubricantes, los aditivos, el lubricante y finalmente el diseño conceptual de la planta de lubricante.

## 1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

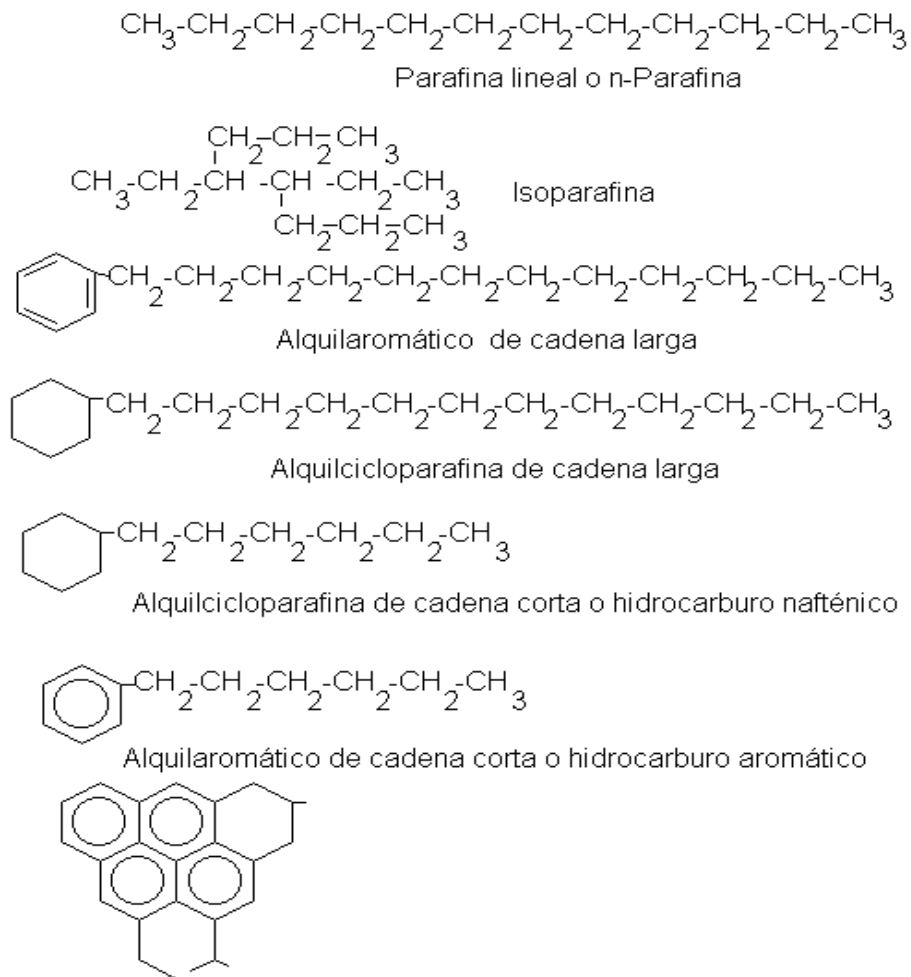
Los aceites lubricantes se clasifican de acuerdo a su composición en vegetales, animales, minerales y sintéticos. Específicamente, los lubricantes minerales tienen dos componentes principales: la base lubricante y los aditivos. La elaboración de lubricantes minerales inicia con la obtención de petróleo crudo.

El petróleo es un recurso natural no renovable que surge de la transformación química de la materia orgánica procedente de animales y vegetales favorecida por las condiciones de presión y temperatura del subsuelo. Sus yacimientos se encuentran en formaciones sedimentarias continentales y marinas a diferentes profundidades, por lo que para su extracción se debe realizar perforaciones del suelo cuya profundidad llega a ser mayor de 5500m. Una vez extraído el petróleo se requiere realizar tratamiento para el retiro de agua, sales y sedimento para luego disponer su comercialización y refinación.

Cada yacimiento de petróleo está constituido por una mezcla de miles de sustancias, compuestas principalmente por átomos de carbono e hidrógeno denominadas hidrocarburos aunque pueden contener además compuestos inorgánicos tales como azufre, níquel y vanadio. El hidrocarburo más básico es el metano que consiste en la unión de un átomo de carbono con cuatro de hidrógeno. Los átomos de hidrógeno y carbono se pueden asociar de diferentes formas para dar lugar a cadenas con mayores o menores ramificaciones, anillos saturados e insaturados con cadenas laterales, etc. Según la predominación de uno de los compuestos característicos los petróleos se pueden clasificar principalmente en crudos parafínicos, nafténicos, aromáticos y sulfurosos.

Uno de los hidrocarburos más empleados para la fabricación de lubricantes son los de origen parafínicos por la estabilidad térmica que ofrecen las bases lubricantes extraídas de estos. Estos crudos presentan una proporción elevada de hidrocarburos tipo  $C_nH_{n+2}$  particularmente parafinas y ceras naturales. Las cadenas parafínicas se conforman por repetición de la estructura  $-CH_2-$  con terminaciones de  $CH_3$  en forma lineal (n-parafinas) o ramificada (isoparafinas), o con uniones a otro tipo de estructura tal como un anillo (alquilcicloparafina).

**Figura 1. Estructura molecular de crudos parafínicos.**



Fuente: UIS Tesis selección y evaluación cuantitativa de aditivos para la extracción líquido-líquido en la obtención de bases lubricantes, 2004

## 1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS CRUDOS SELECCIONADOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BASES LUBRICANTES.

Para la selección de crudos con potencial para la industria de bases lubricantes se deben tener en cuenta las siguientes propiedades:

- Que presenten altos rendimientos de bases lubricantes con especificaciones de calidad acordes con el mercado: índice de viscosidad, color y estabilidad a la oxidación.
- Que tenga un factor de caracterización Watson (KUOP) superior a 12. El factor Kuop, es un valor que permite identificar o caracterizar el tipo de crudo en cuanto a su composición química, (base parafínica, mixta, nafténica, aromática), es un factor que parte de la base de que la densidad de los hidrocarburos está ligada a la relación H/C (por tanto a su carácter químico) y que su punto de ebullición está relacionado a sus átomos de carbono. Así, se ha definido un factor de caracterización Kuop o Kw para los hidrocarburos puros que dependen únicamente de su punto de ebullición y densidad. El factor de caracterización es:

$$K = \frac{(MAVP)^{1/3}}{SG}$$

Donde:

MAVP: Punto de ebullición molar promedio en grados ranking.

SG: gravedad específica a 60°F.

Estos datos se obtienen de la destilación ASTM y del °API, así, el valor de KUOP de los hidrocarburos puros es de 13 para hidrocarburos parafínicos; 12 para hidrocarburos en los que el peso relativo de las cadenas y de los anillos es su equivalente; 11 para los naftenos puros y 10 para aromáticos puros.

Hay que tener en cuenta, que no necesariamente porque un crudo tenga un KUOP por debajo de 12, sus bases sean de mala calidad. Esto debido a que el carbón parafínico no tiene una distribución uniforme en todos sus cortes, por lo que se puede presentar la situación en la cual el factor de caracterización se encuentra en el intervalo de 11.5 a 12.0 y el crudo produzca bases de excelente calidad. Esta situación significa que en los cortes de destilación atmosférica hay más carbón aromático que en los cortes de destilación al vacío. Este es el caso del crudo Cupiagua en Colombia.

## **1.2 ETAPAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA BASE LUBRICANTE.**

**1.2.1 Proceso de Refinación.** Por medio de la destilación simulada realizada al crudo, se encuentran los rendimientos de los destilados y con base en estos datos se define la cantidad de crudo a procesar, de tal manera que la cantidad de destilados producidos sea suficiente para procesarlos en las plantas piloto de extracción líquido – líquido y que además generen las cantidades suficientes de aceite desparafinado y de ceras parafínicas para realizar los análisis necesarios.

La obtención de la base lubricante se origina a partir de crudos de características parafínicos. Para ello y después de su extracción y retiro de impurezas, el crudo se debe someter a un proceso de refinación para separar sus componentes, este proceso se realiza en varias etapas (ver Figura 2).

### **a) Destilación Atmosférica**

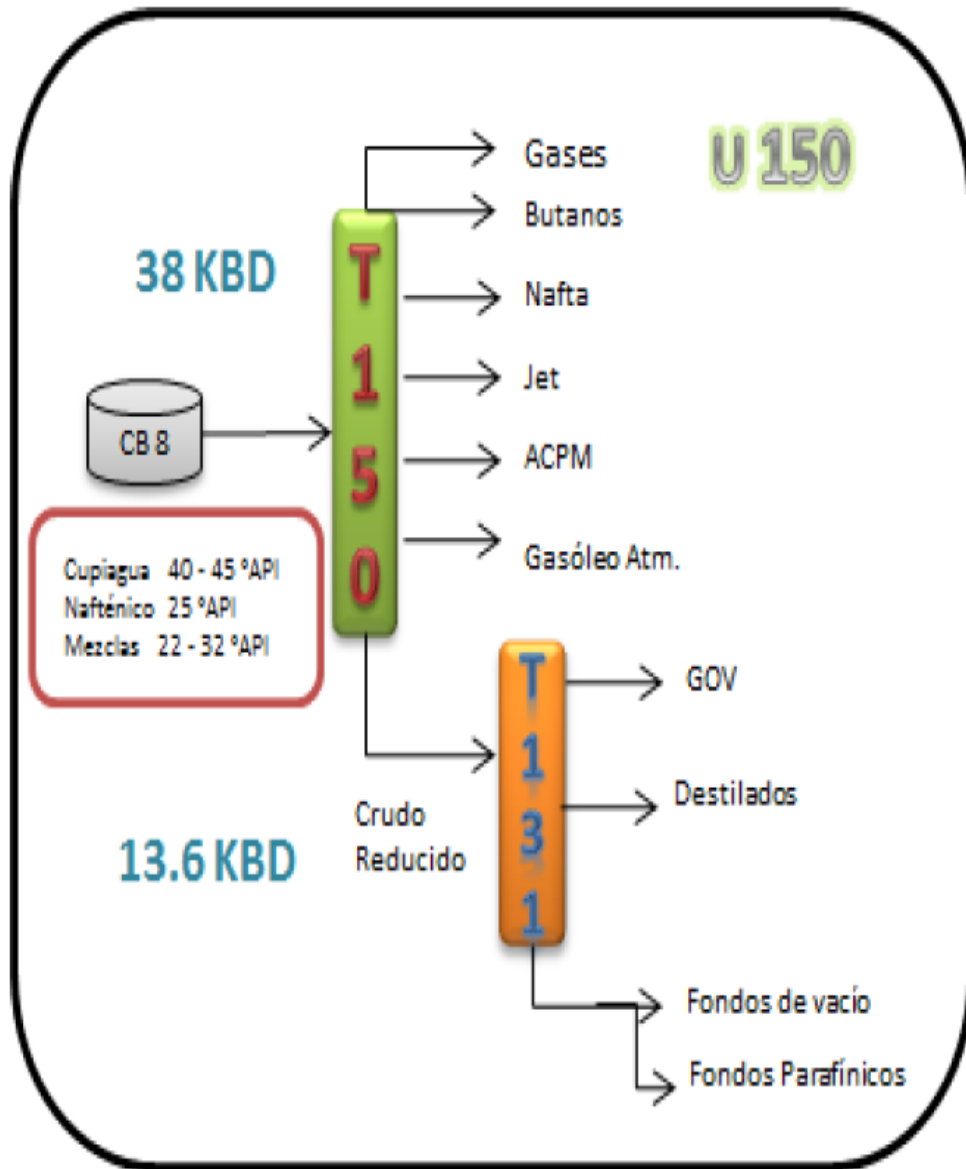
Este proceso inicia por acción de temperatura del orden de 360°C y bajas presiones 1 a 3 psig; separa las fracciones livianas del petróleo en una columna de destilación (también llamadas torres de destilación primaria), tales como gases livianos que son retirados por la cima de la columna de destilación y por la parte lateral de la columna butano, nafta, gasóleo, ACPM, y el producto pesado (llamado

crudo reducido) que es retirado por el fondo de la torre para ser tratado en una segunda etapa de destilación. El principio físico en el que se basa el proceso es la diferencia de volatilidad de los componentes, por tal motivo en las columnas fraccionadoras se adecuan las condiciones termodinámicas para obtener los combustibles deseados.

**b) Destilación al vacío**

Esta segunda etapa, denominada “destilación al vacío”, ocurre a altas temperaturas y muy baja presión (28 mmHg), y separa los gasóleos del crudo reducido (GOV) que se suministran como carga a las unidades de craqueo catalítico para recuperar las últimas fracciones valiosas de crudo tales como naftas y gases livianos (propano, propileno, etano-etileno); los destilados para la producción de bases lubricantes; y los fondos de vacío empleados para la preparación de asfalto y combustóleo.

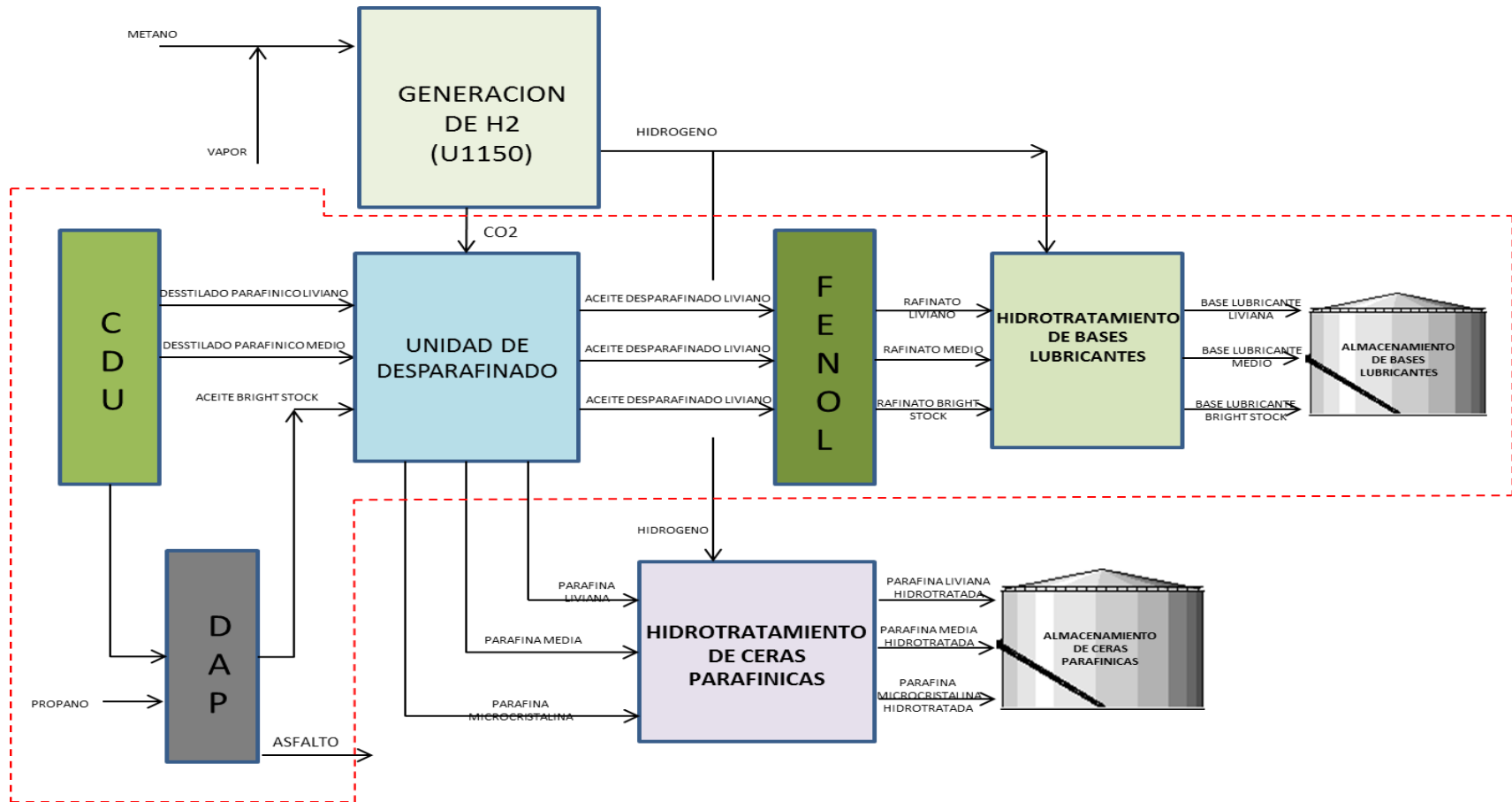
Figura 2. Esquema de Refinación de crudos en la Unidad U150 de la GRB.



Fuente: ECOPEPETROL

Las unidades de destilación al vacío están diseñadas para operar en condiciones termodinámicas adecuadas para destilar las fracciones pesadas del crudo, sin que se produzca modificación de su estructura molecular.

**Figura 3. Esquema básico del proceso de obtención de bases lubricantes en el Departamento de Parafinas y Fenol de la GRB.**

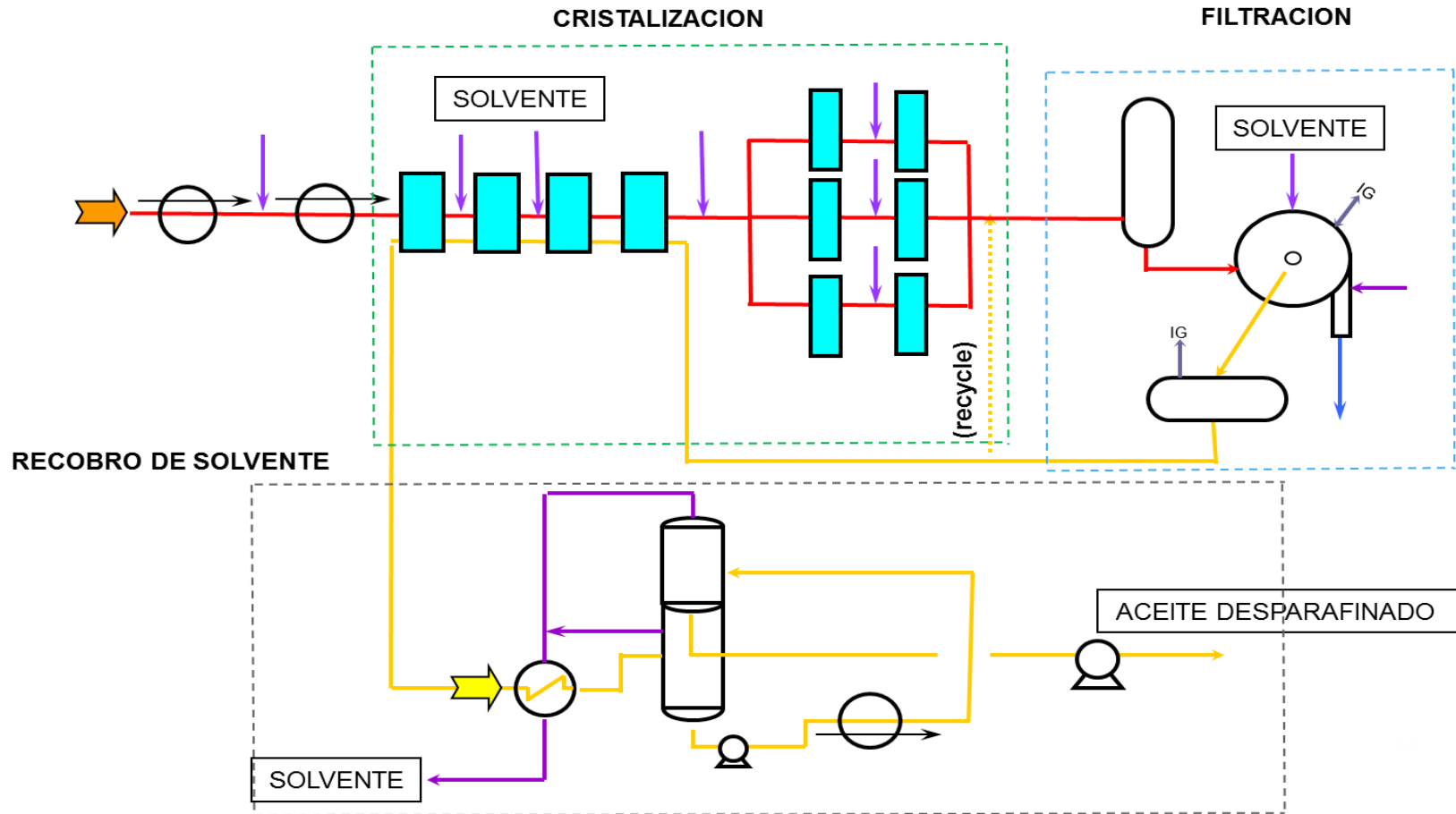


Posteriormente, dentro del Departamento de Parafinas y Fenol, los destilados son sometidos a un tratamiento en tres etapas con el objetivo final de obtener bases lubricantes que serán la materia prima necesaria para la producción de lubricantes por parte de las compañías de este sector. A continuación se detallan las etapas del proceso de obtención de bases lubricantes (ver Figura 3):

**1.2.2 Etapa de Desparafinado** Comúnmente llamado proceso de desparafinado con solvente. Es un proceso realizado a baja temperatura que, mediante el uso del solvente (50% MEK + 50% Tolueno), permite remover las ceras parafínicas que se encuentran en el destilado y que generan al lubricante un alto punto de fluidez. Estas ceras son enviadas a la unidad de hidrotreatmento, mientras que el aceite desparafinado es enviado a la siguiente etapa del proceso, extracción líquido-líquido.

El proceso de remoción de las ceras parafínicas de la base lubricante se da en tres fases (ver Figura 4) una primera fase consiste en la formación uniforme de cristales de cera en un tren de enfriamiento gradual en el cual se le inyecta solvente en varios puntos a través de esta etapa (el MEK hace que la cera se precipite y el Tolueno diluye el aceite), la temperatura de salida de la corriente de carga es de  $-20^{\circ}\text{C}$  para garantizar que las ceras contenidas en el destilado se solidifiquen para que, en la siguiente etapa del proceso, llamada filtración sea fácilmente separada del aceite. La solución aceite cera fluye hacia unos filtros que tiene un tambor rotativo cubierto con una lona y que median un sistema de vacío. La cera queda retenida en ésta y el aceite libre de cera pasa a través de los poros de la lona para, finalmente, en una tercera etapa, el solvente contenido en el aceite sea recuperado para su re-uso y el aceite es enviado al proceso de extracción líquido-líquido.

Figura 4: Esquema de una unidad de desparafinado con solvente.



### **a) Proceso de Extracción Líquido-Líquido**

En esta etapa del proceso se emplea fenol como solvente permite separar el material aromático y/o nafténico, y mejorar así el índice de viscosidad del aceite parafínico resultante, y que se suele conocer como “rafinato” es una base lubricante rica en compuestos parafínicos y cumple un determinado índice de viscosidad.

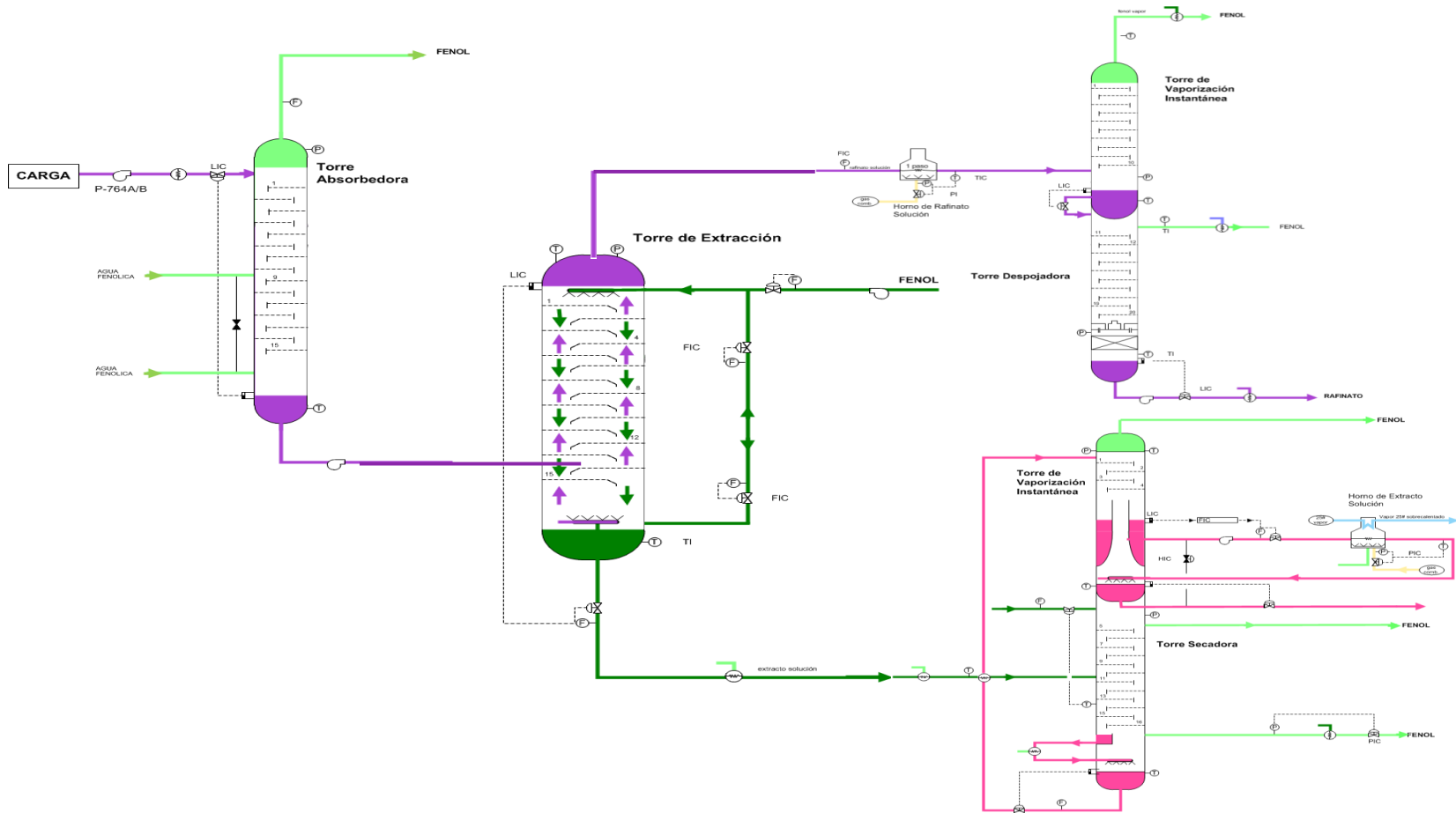
El proceso de extracción líquido es usado para separar especies moleculares con similares rangos de ebullición utilizando las diferentes solubilidades de los compuestos que se desean separar en un solvente dado; en este caso, el fenol es usado para separar compuestos nafténicos y aromáticos de los de tipo parafínico. Los compuestos nafténicos y aromáticos son más solubles en el fenol que los parafínicos, por lo que pueden ser extraídos selectivamente de la mezcla de los tres, que constituyen la carga a este proceso. La carga de aceite desparafinado se ingresa en el fondo de la torre extractora y el fenol ingresa por la cima, la fase rica en aceite asciende a través de la torre en forma de gotas y la fase rica en fenol desciende en la torre, en la que se usan platos o empaques para proveer un contacto íntimo entre las dos fases con el propósito de disolver la mayor cantidad posible del material soluble de la carga en el fenol. Luego del proceso de extracción líquido-líquido, la corriente de rafinato y extracto ricos en fenol son sometidas a un proceso de destilación para recuperar el solvente el cual retornara a la torre de extracción (ver Figura 5).

### **b) Proceso de Hidrotratamiento**

Esta última etapa tiene como objeto transformar el rafinato en base lubricante mediante un tratamiento de hidrogenación catalítica no severa. Este tratamiento persigue la remoción de azufre, oxígeno, nitrógeno del producto, así como la saturación de olefinas. Con ello el rafinato mejora su color, índice de viscosidad y estabilidad a la oxidación. Los compuestos de azufre son convertidos a sulfuro de hidrogeno, el nitrógeno en amoniaco, las olefinas hidrogenadas a parafinas y los

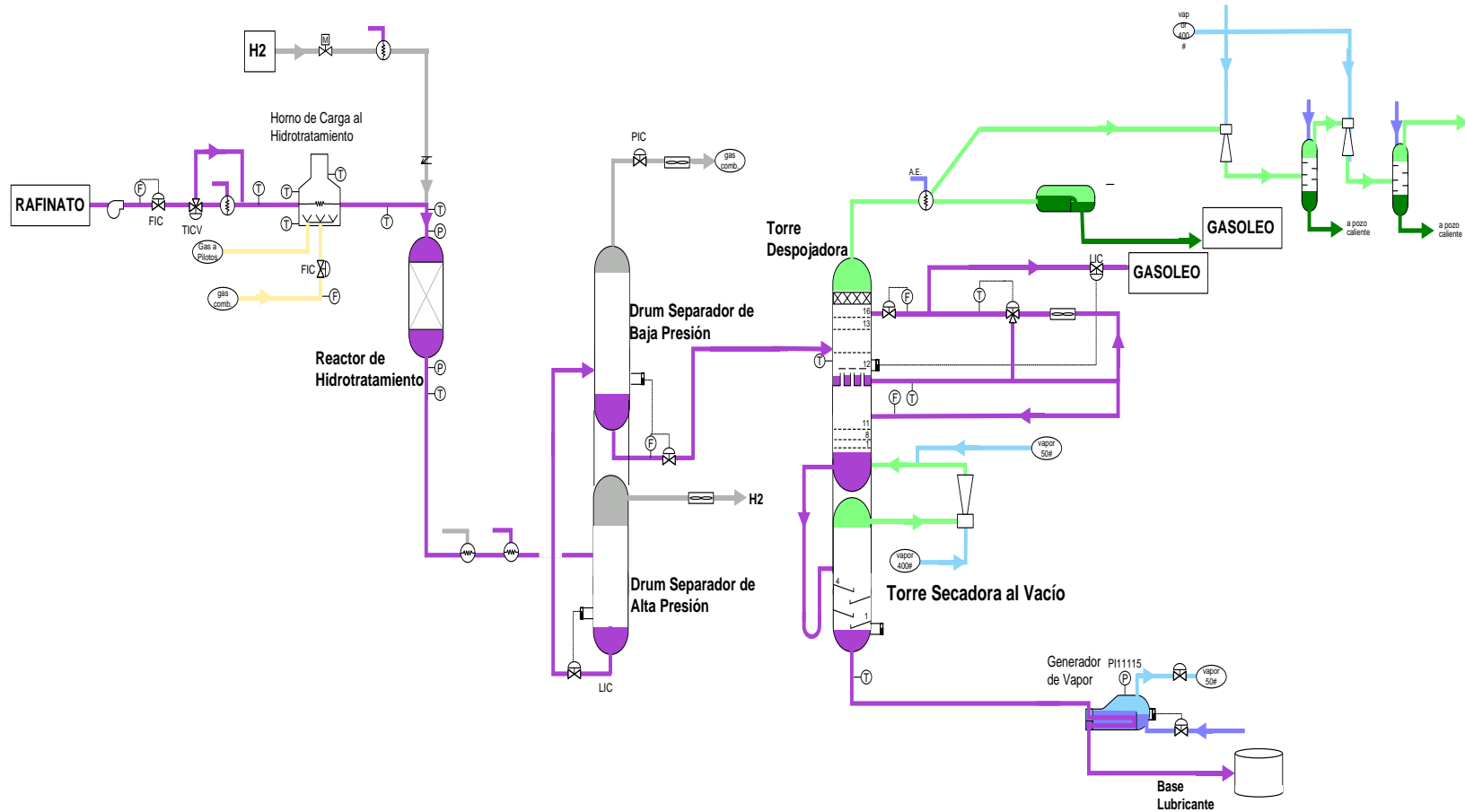
anillos aromáticos son saturados, estos compuestos no deseados en las bases lubricantes son removidos mediante despojo con vapor (ver Figura 6).

Figura 5. Esquema de una Unidad de extracción Líquido-Líquido.



Fuente: ECOPETROL S.A.

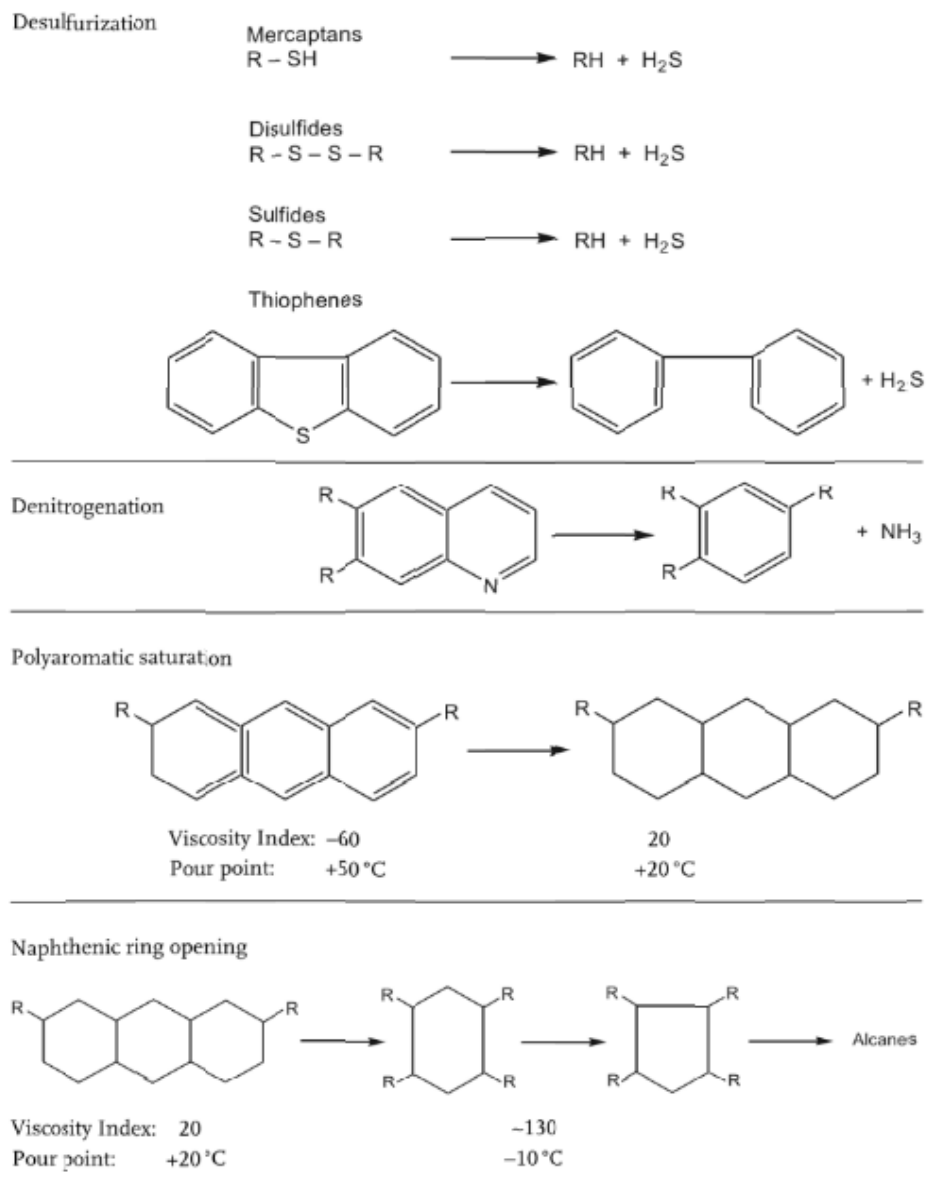
Figura 6. Esquema de una Unidad de Hidrotratamiento de Bases Lubricantes.



Fuente: ECOPETROL S.A.

Estas reacciones se ilustran mediante las fórmulas mostradas en la Figura 7.

**Figura 7. Reacciones químicas que ocurren en la hidrogenación de las bases lubricantes.**



Fuente: Lubricants and Lubrication. Theo Mang and Wilfried Dresel, Ed. WILEY-VCH 2007.

## 1.3 LAS BASES LUBRICANTES

**1.3.1 Clasificación** Las bases lubricantes o también llamadas aceites básicos es el elemento más importante de los lubricantes, y contribuyen con características significativas de desempeño de estos, tales como estabilidad térmica, viscosidad, volatilidad, propiedades a baja temperatura, la habilidad para disolver aditivos y contaminantes, demulsibilidad, resistencia a la formación de espuma y estabilidad a la oxidación. Las características de los aceites básicos son fundamentales en las distintas aplicaciones de los lubricantes, y la forma de medir estas propiedades es muy importante a la hora de fabricar aceites terminados.

De acuerdo con el Instituto Americano del Petróleo (API, por sus siglas en inglés) los aceites base se clasifican en cinco categorías (API 1509, Apéndice E). Los primeros tres grupos son de origen mineral, y básicamente provienen de la refinación del petróleo. Los aceites base del Grupo IV son totalmente sintéticos (Polialfaolefinas). Los aceites del Grupo V son todos los aceites que no están incluidos en los Grupos I al IV. De esta clasificación, las bases tipo I, II y III son de origen mineral y las restantes sintéticas (Tabla 1).

**Tabla 1. Clasificación API de las bases lubricantes.**

Clasificación API de bases lubricantes				
GRUPO	Especificaciones físicas			Procesos de fabricación
	IV	Azufre %peso	Saturados % peso	
I	80-120	>0,03	<90	Convencional(Refinación con solventes
II	80-120	<0,03	>90	Requiere hidrocraqueo/desparafinado
III	>120	<0,03	>90	Requiere hidrocraqueo/desparafinado severo
IV	>140	0	>90	Síntesis química- PAO
V				Todos los otros sintéticos - esterres, poliglicoles, esterres fosfatados

**Fuente:** MARTINS, Marcelo E. Ingeniero de Lubricación Senior, ExxonMobile, Lubricants and Specilaites.

**1.3.1.1 Base Lubricante tipo I** Los bases lubricantes API Grupo I fueron durante muchos años el único tipo de aceite utilizado para la fabricación de aceites lubricantes; sin embargo, las nuevas exigencias de los motores modernos maquinaria industrial requirieron de aceites más refinados y de mejores características para una efectiva lubricación y control de la fricción. Estos aceites contienen hidrocarburos de 20 a 30 átomos de carbono. Los aceites base del Grupo I tienen menos del 90 por ciento de los hidrocarburos saturados, más de 0.03 por ciento de azufre y un índice de viscosidad en el rango de 80 a 120. El rango de operación de la temperatura para estos aceites está entre 0°C y 65°C. Los aceites base del Grupo I son refinados por solventes, que es el proceso más simple de refinación. Esta es la razón por la que son los más baratos en el mercado; su desventaja con respecto a los otros Aceites bases es que los aceites básicos del Grupo I contienen un menor número de moléculas saturadas y un mayor porcentaje de azufre comparados con los grupos II y III, lo cual da como resultado una mayor formación de ácidos, depósitos, lodos y barnices en el motor. Una característica deseable de los aceites Grupo I es su mayor solubilidad, propiedad que facilita la mezcla del aceite con los aditivos en el proceso de manufactura de lubricantes.

**1.3.1.2 Base Lubricante tipo II** Los aceites base del Grupo II tienen más del 90 por ciento de los hidrocarburos saturados, menos de 0.03 por ciento de azufre y un índice de viscosidad entre 80 y 120. Son fabricados empleando un proceso de hidrofraccionado, que es más complejo que el empleado para fabricar aceites base Grupo I, reduciendo así su contenido de azufre y el número de moléculas o enlaces insaturados presentes en el aceite. Como todas las moléculas del hidrocarburo de estos aceites están completamente saturadas, Su punto de fluidez, su índice de viscosidad (IV) y su estabilidad a la oxidación mejoran de forma independiente en cada uno de los procesos dando como resultado aceites básicos de alta pureza, alta resistencia a la oxidación y mejor desempeño a bajas temperaturas, también tienen un color más claro. En el mercado de aceites

básicos tiene más demanda los aceites base del Grupo II que los aceites base del Grupo I por poseer mejores propiedades.

De acuerdo con una publicación realizada por la empresa experta en lubricación NORIA en el que señala que Un estudio reciente acerca del tipo de aceites base usados en las plantas, muestra un cambio dramático en comparación con los resultados de hace un poco más de una década. Los aceites base del Grupo II son los más comúnmente empleados en las plantas, representando un 47 por ciento en las plantas del estudio. Esto comparado contra el 21 por ciento que representaban los básicos del Grupo II y Grupo III de la década pasada. Actualmente, los básicos del grupo III suman menos del 1 por ciento en las plantas del estudio. Los básicos del Grupo I contabilizaban hace una década el 56 por ciento en las plantas, ahora suman apenas un 28 por ciento.

**1.3.1.3 Base Lubricante tipo III** Tienen más del 90 por ciento de los hidrocarburos saturados, menos de 0.03 por ciento de azufre y un índice de viscosidad mayor a 120. Estos aceites están mejor refinados que los aceites base del Grupo II y generalmente pasan por un proceso de hidrofraccionado severo (alta presión y temperatura). Este proceso permite obtener un aceite base mucho más puro, su desempeño es similar a los aceites sintéticos, es por esta razón que combinados con aditivos selectos son generalmente comercializados como lubricantes sintéticos o semi-sintéticos.

**1.3.1.4 Base Lubricante tipo IV** Son bases sintéticas químicamente modificadas, especialmente del tipo Polialfaolefinas (PAO). Esos básicos sintéticos están hechos por medio de un proceso llamado síntesis. Tienen un rango de temperatura de operación mucho más amplio y son muy buenos para usos en condiciones extremadamente frías o aplicaciones de alta temperatura.

**1.3.1.5 Base Lubricante tipo V** En los aceites base del Grupo V están todos los demás aceites base no incluidas en los cuatro grupos anteriores, principalmente los aceites de origen nafténicos y los sintéticos que no son fabricados con PAO. Los ésteres y ésteres de poliol son de los más usuales aceites Grupo V. Las bases Grupo V no son generalmente utilizadas como tales para la fabricación de lubricantes sino que a través de su uso en aditivos mejoran las propiedades de las otras bases lubricantes. Un ejemplo sería un aceite para compresor a base de PAO que se mezcla con un poliol-éster. Los ésteres son aceites base del Grupo V que se emplean en diferentes formulaciones para mejorar las propiedades de otros aceites base. Los aceites a base de éster pueden trabajar mejor a elevadas temperaturas y proporcionan mejor detergencia, comparados con los sintéticos PAO, los cuales, por ser más resistentes a la oxidación, incrementan las horas de operación del lubricante.

**1.3.2 Análisis físico-químicos para determinar la calidad de las bases lubricantes.** Las normas de referencia más aceptadas internacionalmente para los análisis físico-químicos de combustibles y lubricantes son las normas ASTM (American Society for Testing and Material). En la Tabla 2 y Tabla 3 se muestran las normas ASTM empleadas para determinar la calidad de las bases lubricantes, así como los valores que deben especificarse para la base lubricante de origen mineral ISO 32 e ISO 68. A continuación se describe cada uno de los análisis físico-químicos que requiere una base lubricante.

**Tabla 2. Características físico-químicas que debe cumplir la base lubricante de origen mineral para grado ISO 32.**

Propiedades	Método	Unidades	Valor especificado	
	ASTM		Mínimo	Máximo
Color ASTM	D1500			1,5
Corrosión lámina de cobre, 3 horas a 100°C	D130			1

Propiedades	Método	Unidades	Valor especificado	
	ASTM		Mínimo	Máximo
Contenido de agua y sedimento	D96	% en volumen		0,05
Índice de Viscosidad	D2270		95	
Numero de Neutralización	D664	m KOH/g		0,05
Punto de Fluidez	D 97	°C (°F)		0 (+30)
Punto de Inflamación	D92	°C (°F)	200 (392)	
Residuo carbón conradson	D4530	% en masa		0,05
Tiempo de separación de la emulsión	D1401	minutos		15
Viscosidad a 100°C (212°F)	D445	mm <sup>2</sup> /s(SSU)	3,9(39,1)	5,0(42,7)
Viscosidad a 40°C (104°F)	D445	61.2	72.4	
Ceniza	D482	% en masa		0,01
Densidad a 60°C	D4052-11	Kg/m <sup>3</sup>	Reportar	
Gravedad API	D4052-11	Grados API	Reportar	

**Tabla 3. Características físico-químicas que debe cumplir la base lubricante de origen mineral para grado ISO 68.**

Propiedades	Método	Unidades	Valor especificado	
	ASTM		Mínimo	Máximo
Color ASTM	D1500			3,5
Corrosión lámina de cobre, 3 horas a 100°C	D130			1
Contenido de agua y sedimento	D96	% en volumen		0,05
Índice de Viscosidad	D2270		95	
Numero de Neutralización	D664	m KOH/g		0,05
Punto de Fluidez	D 97	°C (°F)		0 (+30)
Punto de Inflamación	D92	°C (°F)	220 (428)	
Residuo carbón conradson	D4530	% en masa		0,1

Propiedades	Método	Unidades	Valor especificado	
	ASTM		Mínimo	Máximo
Tiempo de separación de la emulsión	D1401	minutos		15
Viscosidad a 100°C (212°F)	D445	mm <sup>2</sup> /s(SSU)	8(39,1)	9(42,7)
Viscosidad a 40°C (104°F)	D445	61.2	74.8	
Ceniza	D482	% en masa		0,01
Densidad a 60°C	D4052-11	Kg/m <sup>3</sup>	Reportar	
Gravedad API	D4052-11	Grados API	Reportar	

**1.3.2.1 Color (ASTM D-1500) y fluorescencia** En la medida en que avanza la tecnología, los requerimientos para los aceites lubricantes son más altos desde el punto de vista de mantener sus propiedades en el tiempo y para intervalos amplios de utilización como es el caso de la temperatura. Para cumplir con estas exigencias se recurre a los aceites sintéticos o en mejorar las propiedades físico-químicas de los naturales (inyección de aditivos). Los aditivos utilizados por lo general pigmentan el lubricante dando tonalidades oscuras, sin embargo, la base lubricante debe cumplir siempre un valor en el color para garantizar que los lubricantes de diferentes lotes de preparación siempre tendrán el mismo color y la misma intensidad. El estándar de color utilizado es el ASTM D-1500, el cual tiene una escala que va de 0 a 8, siendo el más incoloro el más bajo. En el caso de aceites poco coloreados se utiliza el colorímetro Saybolt el cual tiene una escala que va de -16 correspondiente al blanco amarillento, hasta +30 que corresponde al color del agua destilada.

La fluorescencia es un indicativo de la naturaleza química del aceite. La fluorescencia azulada caracteriza a los aceites nafténicos y la amarilla a los parafínicos.

**1.3.2.2 Corrosión en cinta de cobre (ASTM D-130)** El petróleo crudo contiene compuestos de azufre, la mayoría de los cuales se eliminan durante el refinado. Sin embargo, algunos de los compuestos de azufre remanentes en los productos del petróleo, pueden tener una acción corrosiva sobre diversos metales y esta corrosividad no está relacionada directamente con el contenido total de azufre. El efecto puede variar de acuerdo con los tipos de compuestos químicos de azufre presentes. El ensayo de corrosión a la lámina de cobre se diseña para evaluar el grado relativo de corrosividad de un producto del petróleo.

Esta prueba consiste en sumergir una lámina de cobre pulida en un volumen específico de la muestra a ensayar y se calienta bajo condiciones de temperatura y tiempo que se especifican para la clase de material que se está ensayando. Al final del - 57 - periodo de calentamiento, la lámina de cobre se retira, se lava y se evalúa el color y nivel de ataque, que se clasifica dentro de una de las cuatro categorías que se señalan en el Patrón de Referencia ASTM para corrosión de lámina de cobre.

**1.3.2.3 Contenido de agua y sedimento (ASTM D 96)** Este método tiene por objeto establecer el procedimiento para la determinación de agua y sedimentos en aceites y combustibles líquidos, mediante centrifugación en presencia de un disolvente (Tolueno) y un agente demulsificante. El contenido de agua y sedimento presente en las bases lubricantes son sustancias no deseables que generan degradación de la base y corrosión en los equipos.

**1.3.2.4 Viscosidad cinemática a 100°C (212°F) (ASTM D445-14E2) y Viscosidad a 40°C (104°F) (ASTM D445-14E2)** El aspecto más importante a de la base lubricante es su viscosidad (característica fundamental del lubricante). Se mide en centistokes (cSt), a una determinada temperatura que suelen ser 100°C y 40 °C. La viscosidad de un aceite es su capacidad para fluir o su resistencia interna al flujo. Esta propiedad indica como de pesada es la base lubricante. Las

bases más ligeras tienen una viscosidad alrededor de 2 cSt (a 100 °C), mientras que las más pesadas están en 45 cSt (a 100 °C).

La viscosidad cinemática de un fluido es su viscosidad dinámica dividida por su densidad, ambos medidos a la misma temperatura, y expresada en unidades consistentes. Las unidades más comunes que se utilizan para expresar la viscosidad cinemática son: stokes (St) o centistokes (cSt, donde 1 cSt = 0,01 St), o en unidades del SI como milímetros cuadrados por segundo ( $\text{mm}^2/\text{s}$ , donde 1  $\text{mm}^2/\text{s}$  = 1 cSt).

**1.3.2.5 Índice de viscosidad (IV) (ASTM D 2270)** El índice de viscosidad (VI) de un aceite es el término utilizado para expresar la “resistencia a cambiar la viscosidad del aceite conforme cambia la temperatura. Normalmente se desea que el VI sea lo más alto posible, ya que eso significa que la lubricación de las superficies es relativamente similar a todas las temperaturas. Los valores de esta propiedad suelen ser mayores de 90, estando su valor habitual entre 95 y 105 para las bases convencionales (Figura 8).

**Figura 8. Variación de la viscosidad con el aumento de temperatura en tres lubricantes de diferentes índices de viscosidad.**



Fuente: SLIDE SHARE Shell fundamentos de lubricantes [en línea] disponible en: <http://es.slideshare.net/AvelinoSantiago/shell-fundamentos-de-lubricantes>.

Con el incremento en la temperatura la viscosidad de los aceites tiende a reducirse, aunque no todos los aceites reducen la viscosidad en las mismas proporciones. Lo ideal sería un aceite cuya viscosidad permanezca constante en un intervalo amplio de temperatura de operación. Ello no se alcanza en la práctica, por lo que se introdujo el concepto de índice de viscosidad, el cual es una correlación entre la viscosidad a baja temperatura respecto a la viscosidad a alta temperatura. Los aceites cuya viscosidad es menos sensible al cambio de temperatura se consideran que tienen un alto VI. Para calcular el valor de VI se utiliza la siguiente ecuación:

$$VI = \frac{L-U}{L-H} * 100$$

Donde:

L: viscosidad de un aceite a 40 °C en cSt, cuyo VI = 0 y con la misma viscosidad a 100 °C que el aceite a analizar.

U: viscosidad a 40 °C en cSt del aceite a analizar.

H: viscosidad de un aceite a 40 °C en cSt, cuyo VI = 100 y con la misma viscosidad a 100 °C que el aceite a analizar.

**Tabla 4. Tabla para el cálculo del índice de viscosidad.**



**TABLE 1 Basic Values for L and H for Kinematic Viscosity in 40–100°C System**

Kinematic Viscosity at 100°C, mm <sup>2</sup> /s (cSt)	L		H		Kinematic Viscosity at 100°C, mm <sup>2</sup> /s (cSt)	L		H		Kinematic Viscosity at 100°C, mm <sup>2</sup> /s (cSt)	L		H		Kinematic Viscosity at 100°C, mm <sup>2</sup> /s (cSt)	L		H	
	L	H	L	H		L	H	L	H		L	H	L	H		L	H		
2.00	7.994	6.394	7.00	78.00	48.57	12.0	201.9	108.0	17.0	369.4	180.2	24.0	683.9	301.8	42.5	1935	714.9		
2.10	8.640	6.894	7.10	80.25	49.61	12.1	204.8	109.4	17.1	373.3	181.7	24.2	694.5	305.6	43.0	1978	728.2		
2.20	9.309	7.410	7.20	82.39	50.69	12.2	207.8	110.7	17.2	377.1	183.3	24.4	704.2	309.4	43.5	2021	741.3		
2.30	10.00	7.944	7.30	84.53	51.78	12.3	210.7	112.0	17.3	381.0	184.9	24.6	714.9	313.0	44.0	2064	754.4		
2.40	10.71	8.496	7.40	86.66	52.88	12.4	213.6	113.3	17.4	384.9	186.5	24.8	725.7	317.0	44.5	2108	767.6		
2.50	11.45	9.063	7.50	88.85	53.98	12.5	216.6	114.7	17.5	388.9	188.1	25.0	736.5	320.9	45.0	2152	780.9		
2.60	12.21	9.647	7.60	91.04	55.09	12.6	219.6	116.0	17.6	392.7	189.7	25.2	747.2	324.9	45.5	2197	794.5		
2.70	13.00	10.25	7.70	93.20	56.20	12.7	222.6	117.4	17.7	396.7	191.3	25.4	758.2	328.8	46.0	2243	808.2		
2.80	13.80	10.87	7.80	95.43	57.31	12.8	225.7	118.7	17.8	400.7	192.9	25.6	769.3	332.7	46.5	2288	821.9		
2.90	14.63	11.50	7.90	97.72	58.45	12.9	228.8	120.1	17.9	404.6	194.6	25.8	779.7	336.7	47.0	2333	835.5		
3.00	15.49	12.15	8.00	100.0	59.60	13.0	231.9	121.5	18.0	408.6	196.2	26.0	790.4	340.5	47.5	2380	849.2		
3.10	16.36	12.82	8.10	102.3	60.74	13.1	235.0	122.9	18.1	412.6	197.8	26.2	801.6	344.4	48.0	2426	863.0		
3.20	17.26	13.51	8.20	104.6	61.89	13.2	238.1	124.2	18.2	416.7	199.4	26.4	812.8	348.4	48.5	2473	876.9		
3.30	18.18	14.21	8.30	106.9	63.05	13.3	241.2	125.6	18.3	420.7	201.0	26.6	824.1	352.3	49.0	2521	890.9		
3.40	19.12	14.93	8.40	109.2	64.18	13.4	244.3	127.0	18.4	424.9	202.6	26.8	835.5	356.4	49.5	2570	905.3		
3.50	20.09	15.66	8.50	111.5	65.32	13.5	247.4	128.4	18.5	429.0	204.3	27.0	847.0	360.5	50.0	2618	919.6		
3.60	21.08	16.42	8.60	113.9	66.48	13.6	250.6	129.8	18.6	433.2	205.9	27.2	857.5	364.6	50.5	2667	933.6		
3.70	22.09	17.19	8.70	116.2	67.64	13.7	253.8	131.2	18.7	437.3	207.6	27.4	869.0	368.8	51.0	2717	948.2		
3.80	23.13	17.97	8.80	118.5	68.79	13.8	257.0	132.6	18.8	441.5	209.3	27.6	880.6	372.3	51.5	2767	962.9		
3.90	24.19	18.77	8.90	120.9	69.94	13.9	260.1	134.0	18.9	445.7	211.0	27.8	892.3	376.4	52.0	2817	977.5		
4.00	25.32	19.56	9.00	123.3	71.10	14.0	263.3	135.4	19.0	449.9	212.7	28.0	904.1	380.6	52.5	2867	992.1		
4.10	26.50	20.37	9.10	125.7	72.27	14.1	266.6	136.8	19.1	454.2	214.4	28.2	915.8	384.6	53.0	2918	1007		
4.20	27.75	21.21	9.20	128.0	73.42	14.2	269.8	138.2	19.2	458.4	216.1	28.4	927.6	388.8	53.5	2969	1021		
4.30	29.07	22.05	9.30	130.4	74.57	14.3	273.0	139.6	19.3	462.7	217.7	28.6	938.6	393.0	54.0	3020	1036		
4.40	30.48	22.92	9.40	132.8	75.73	14.4	276.3	141.0	19.4	467.0	219.4	28.8	951.2	396.6	54.5	3073	1051		
4.50	31.96	23.81	9.50	135.3	76.91	14.5	279.6	142.4	19.5	471.3	221.1	29.0	963.4	401.1	55.0	3125	1066		
4.60	33.52	24.71	9.60	137.7	78.08	14.6	283.0	143.9	19.6	475.7	222.8	29.2	975.4	405.3	55.5	3180	1082		
4.70	35.13	25.63	9.70	140.1	79.27	14.7	286.4	145.3	19.7	479.7	224.5	29.4	987.1	409.5	56.0	3233	1097		
4.80	36.79	26.57	9.80	142.7	80.46	14.8	289.7	146.8	19.8	483.9	226.2	29.6	998.9	413.5	56.5	3286	1112		
4.90	38.50	27.53	9.90	145.2	81.67	14.9	293.0	148.2	19.9	488.6	227.7	29.8	1011	417.6	57.0	3340	1127		
5.00	40.23	28.49	10.0	147.7	82.87	15.0	296.5	149.7	20.0	493.2	229.5	30.0	1023	421.7	57.5	3396	1143		
5.10	41.99	29.46	10.1	150.3	84.08	15.1	300.0	151.2	20.2	501.5	233.0	30.5	1055	432.4	58.0	3452	1159		
5.20	43.76	30.43	10.2	152.9	85.30	15.2	303.4	152.6	20.4	510.8	236.4	31.0	1086	443.2	58.5	3507	1175		
5.30	45.53	31.40	10.3	155.4	86.51	15.3	306.9	154.1	20.6	519.9	240.1	31.5	1119	454.0	59.0	3563	1190		
5.40	47.31	32.37	10.4	158.0	87.72	15.4	310.3	155.6	20.8	528.8	243.5	32.0	1151	464.9	59.5	3619	1206		
5.50	49.09	33.34	10.5	160.6	88.95	15.5	313.9	157.0	21.0	538.4	247.1	32.5	1184	475.9	60.0	3676	1222		
5.60	50.87	34.32	10.6	163.2	90.19	15.6	317.5	158.6	21.2	547.5	250.7	33.0	1217	487.0	60.5	3734	1238		
5.70	52.64	35.29	10.7	165.8	91.40	15.7	321.1	160.1	21.4	556.7	254.2	33.5	1251	498.1	61.0	3792	1254		
5.80	54.42	36.26	10.8	168.5	92.65	15.8	324.6	161.6	21.6	566.4	257.8	34.0	1286	509.6	61.5	3850	1270		
5.90	56.20	37.23	10.9	171.2	93.92	15.9	328.3	163.1	21.8	575.6	261.5	34.5	1321	521.1	62.0	3908	1286		
6.00	57.97	38.19	11.0	173.9	95.19	16.0	331.9	164.6	22.0	585.2	264.9	35.0	1356	532.5	62.5	3966	1303		
6.10	59.74	39.17	11.1	176.6	96.45	16.1	335.5	166.1	22.2	595.0	268.6	35.5	1391	544.0	63.0	4026	1319		
6.20	61.52	40.15	11.2	179.4	97.71	16.2	339.2	167.7	22.4	604.3	272.3	36.0	1427	555.6	63.5	4087	1336		
6.30	63.32	41.13	11.3	182.1	98.97	16.3	342.9	169.2	22.6	614.2	275.8	36.5	1464	567.1	64.0	4147	1352		
6.40	65.18	42.14	11.4	184.9	100.2	16.4	346.6	170.7	22.8	624.1	279.6	37.0	1501	579.3	64.5	4207	1369		
6.50	67.12	43.18	11.5	187.6	101.5	16.5	350.3	172.3	23.0	633.6	283.3	37.5	1538	591.3	65.0	4268	1386		
6.60	69.16	44.24	11.6	190.4	102.8	16.6	354.1	173.8	23.2	643.4	286.8	38.0	1575	603.1	65.5	4329	1402		
6.70	71.29	45.33	11.7	193.3	104.1	16.7	358.0	175.4	23.4	653.8	290.5	38.5	1613	615.0	66.0	4392	1419		
6.80	73.48	46.44	11.8	196.2	105.4	16.8	361.7	177.0	23.6	663.3	294.4	39.0	1651	627.1	66.5	4455	1436		
6.90	75.72	47.51	11.9	199.0	106.7	16.9	365.6	178.6	23.8	673.7	297.9	39.5	1691	639.2	67.0	4517	1454		
												40.0	1730	651.8	67.5	4580	1471		
												40.5	1770	664.2	68.0	4645	1488		
												41.0	1810	676.6	68.5	4709	1506		
												41.5	1851	689.1	69.0	4773	1523		
												42.0	1892	701.9	69.5	4839	1541		
															70.0	4905	1558		

Fuente: ASTM.ORG

La Tabla 3 muestra los valores de viscosidad cinemática de los aceites a 100°C en un rango entre 2 mm<sup>2</sup>/s y 70mm<sup>2</sup>/s; en caso que el valor de la viscosidad de no se encuentre en la tabla, pero se encuentra entre los rangos dados se puede realizar el cálculo por medio de interpolación, y después se extraen los valores de L y H; en caso que el valor de la viscosidad del aceite se encuentre por encima de

70 mm<sup>2</sup>/s a 100°C, el cálculo de los valores para L y H se realizan de la siguiente manera:

$$L = 0.8353*Y^2 + 14.67*Y - 296$$

$$H = 0.1684*Y^2 + 11.85*Y - 97$$

Donde Y= Viscosidad cinemática a 100°C del aceite que se quiere calcular el índice de viscosidad en mm<sup>2</sup>/s.

**1.3.2.6 Número de neutralización (NN) (ASTM D-664-11A)** El número de neutralización mide la cantidad de ácidos carbónicos libres que hay en las bases lubricantes o que se formaron por oxidación durante su almacenamiento o uso. Se expresa como la cantidad en miligramos de hidróxido de potasio (KOH), necesarios para neutralizar un gramo de la muestra. Este es un parámetro de la calidad del producto o de su deterioro y un indicativo del estado de los equipos en donde se usa.

Para determinar el número de neutralización se toman dos matraces de vidrio pirex, con tapa de vidrio esmerilado de 100 ml cada uno, limpios y secos. Se pesan en balanzas analíticas con precisión de 0.0001 g y a uno de ellos se les adiciona la muestra del aceite a analizar en una cantidad de 0.2 a 0.3 g. A cada matraz se le adicionan 15 ml de alcohol etílico, se le adicionan 3-4 gotas de indicador (azul de timol) y cada matraz se titula con una solución al 0.1N de KOH en alcohol. La titulación se termina con el cambio de color de la solución de amarilla en medio ácido a azul en medio básico. El número de neutralización se determina a partir de la fórmula:

$$NN = \frac{(a - b)0.0056K}{g}$$

Donde:

a = volumen 0.1 N de la solución de KOH que se necesitó para titular la sustancia a analizar, ml.

b = volumen 0.1 N de la solución de KOH que se necesitó para titular el blanco, ml.

0.0056- el número de gramos de KOH en 1 ml 0.1 N de la solución de KOH.

K- correctivo sobre el 0.1 N de la solución de KOH.

g- cantidad pesada de la sustancia analizada, g.

**1.3.2.7 Punto de fluidez (ASTM D-97)** Es la temperatura más baja a la cual el aceite deja de fluir por lo que se pierde la capacidad de lubricación y las piezas móviles pierden su movilidad, es decir el aceite a bajas temperaturas se va volviendo más viscoso, hasta que llega el momento en que deja de fluir. Esta característica se debe tener en cuenta principalmente en aceites que van a lubricar mecanismos que trabajan a bajas temperaturas, por ejemplo máquinas frigoríficas. Las bases convencionales tienen un punto de congelación en torno a -9°C, pero el de las sintéticas es considerablemente inferior (-20 a -60 °C).

**1.3.2.8 Punto de inflamación (ASTM D-92-12B)** Es la temperatura mínima a la cual se forman suficientes vapores para arder en forma instantánea cuando se suministra una fuente de ignición. Este ensayo se utiliza para determinar las condiciones de almacenamiento y operación, para evitar incendios y explosiones. Una reducción en el punto de inflamación significa contaminación con combustible y un incremento significa pérdida de livianos por evaporación.

El punto de inflamación se halla calentando la muestra en equipos estándares y aplicando una llama instantánea a la proximidad de su superficie, el punto de inflamación es la temperatura a la cual el lubricante enciende sin sostener la llama. Para determinar el punto de inflamación de aceites con puntos de inflamación elevados se utilizan vasos abiertos y para aceites más ligeros se

utilizan vasos cerrados. El punto de inflamación para un lubricante es típicamente de 200°C.

**1.3.2.9 Residuo carbón Conradson (ASTM D 4530-11)** Este método de ensayo mide la tendencia del petróleo y sus derivados a degradarse térmicamente y a formar carbón después de la evaporación y pirolisis de un aceite. El carbón producido por los lubricantes al ser sometidos a altas temperaturas es un indicador de la calidad de las bases y su formación produce depósitos en los equipos generando degradación de los lubricantes y una lubricación inadecuada en equipos generando daños mecánicos.

**1.3.2.10 Tiempo de separación de la emulsión (ASTM D-1401-12)** Este método proporciona una guía para determinar la habilidad de los aceites para separarse del agua, este método de ensayo consiste en preparar una muestra de 40 mL de la base lubricante o de un lubricante a la cual se le adiciona 40 mL de agua destilada la mezcla es agitada por 5 minutos a 54°C, el tiempo requerido para la separación de la emulsión formada es reportada (Figura 9).

**Figura 9. Diferentes muestras de aceite lubricante que muestran la habilidad de separar agua.**



Fuente: ECOPETROL S.A. Informe técnico Los lubricantes.

**1.3.2.11 Cenizas (ASTM 482)** La cantidad de cenizas es un indicativo de la cantidad de sustancias inorgánicas presentes. En los aceites lubricantes este material se relaciona con la cantidad de aditivos que presenta el aceite y en los aceites usados se refleja no solo los aditivos del lubricante, sino que también es un indicativo del desgaste del metal y de suciedad absorbida del medio ambiente.

**1.3.2.12 Densidad (ASTM D 4052-11)** Es la relación existente entre el peso de un volumen determinado de una sustancia y el del agua destilada a 4° C. La densidad así definida coincide en valor numérico con el peso específico. En los aceites lubricantes, esta relación es inferior a la unidad (0,855 a 0,934), lo cual nos indica que son menos pesado que el agua, razón por la que flotan en ella.

**1.3.2.13 Gravedad API (ASTM D 4052-11)** Este procedimiento es más adecuado para la determinación de la densidad relativa o gravedad API y es un factor determinante de la calidad y el precio del petróleo crudo. La gravedad API se define como la masa de la unidad de volumen a una temperatura de referencia. Se puede expresar en gravedad API (°API), en gravedad específica o en densidad. La gravedad específica es la masa de la unidad de volumen del producto dado con respecto a la masa del agua correspondiente al mismo volumen de la muestra y referidos a la temperatura. Normalmente se toma la densidad del líquido a 20 °C y la densidad del agua a 3,98 °C y se expresa como  $d_4^{20}$ . La densidad es el valor absoluto y se expresa como kg/m<sup>3</sup>.

Este método de prueba basa su medición en un hidrómetro de vidrio, para la obtención de gravedad API de crudos y derivados del petróleo manejados normalmente como líquidos y con una presión de vapor Reid (Método de Prueba D 323) de 26psi (180kPa) o menos. Las gravedades son determinadas a 60°F (15.56°C), o convertidas a valores a 60°F, por medio de tablas estándar. Estas tablas no son aplicables a no hidrocarburos o hidrocarburos esencialmente puros tal como los aromáticos.

Este método está basado en el principio que la gravedad o densidad de un líquido varía directamente con la profundidad de inmersión de un cuerpo flotante en este. El cuerpo flotante, el cual está graduado en unidades de gravedad API, es llamado hidrómetro API. La gravedad API es leída observando el hidrómetro flotando libremente y notando la graduación más cercana a la intersección aparente del plano horizontal del líquido con la escala vertical del hidrómetro, después que se ha alcanzado un equilibrio en la temperatura. La temperatura de la muestra puede ser leída en un termómetro exacto ASTM sumergido en la muestra o desde el termómetro que es parte integral del hidrómetro (termo hidrómetro). La gravedad °API es una escala arbitraria dada en grados relacionada a la gravedad específica por la expresión:

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{SG - 131.5}$$

Dónde: SG: gravedad específica a 15.5°C.

Entre mayor sea la densidad o la gravedad específica, menor será el °API. El agua por definición tiene un °API = 10. La densidad cambia con la naturaleza química del aceite así: aceites parafínicos < aceites nafténicos < aceites aromáticos.

Para determinar la gravedad API, se toma un cilindro de vidrio de tal diámetro y altura que permitan introducir el hidrómetro y que éste quede con libertad para flotar sin tocar ni las paredes ni el fondo del cilindro, al llenarlo parcialmente con el aceite a analizar. Se calienta el cilindro con el aceite a la temperatura para la cual está calibrado el densímetro y se introduce el densímetro de tal manera que no toque las paredes del recipiente. En estas condiciones se lee la escala del densímetro y este es el valor de la gravedad °API. La medición se realiza por la parte inferior del menisco.

**1.3.2.14 Azufre (ASTM D 4294)** El contenido en azufre mide el grado de refino de base lubricante de manera que cuanto menor es el contenido de azufre mayor es el refino. La tendencia actual es una disminución progresiva de azufre hasta su práctica ausencia.

## **1.4 LUBRICANTES**

La lubricación juega un papel primordial en el desempeño y vida útil de las máquinas que están sujetas a una constante fricción de sus componentes mecánicos. En este sentido, su función principal es la disminución de las fuerzas de fricción entre dos superficies. Una lubricación adecuada garantiza una mayor protección de las maquinarias y motores, reduciendo el desgaste prematuro de sus componentes y, así, reducir los costos de mantenimiento y mejorar el funcionamiento de los equipos industriales, automóviles, aviones, turbo maquinaria, etc.

Un lubricante además de ser un agente antifricción, actúa como sellante, refrigerante, antioxidante y detergente. Los lubricantes de última generación permiten ahorros de combustible y, por tanto, reducen las emisiones de gases perjudiciales para el medio ambiente, adicionalmente, los aceites lubricantes deben cumplir la función de anti desgaste, anti herrumbre, anti emulsificante, por lo cual se debe mejorar las características de estos, mediante la adición de aditivos para mejorar su desempeño durante su uso en las máquinas.

**1.4.1 Clasificación de los lubricantes** Los lubricantes se pueden clasificar de acuerdo con su estado físico en lubricantes gaseosos, líquidos, semisólidos y sólidos.

De esta clasificación los de más amplio uso son los lubricantes líquidos, que son los que por su característica de fluidez se denominan aceites lubricantes, y estos a su vez se clasifican en aceites simples y aceites compuestos; los aceites simples por su origen se clasifican en aceites lubricantes minerales, aceites lubricantes vegetales, aceites de origen animal y aceites sintéticos.

Los aceites compuestos se obtienen a partir de mezclas de aceites simples o básicos y compuestos químicos llamados aditivos, los aceites bases determinan la propiedad del lubricante, tales como la viscosidad, color, etc. y que este con el uso en el tiempo se empieza a degradar perdiendo sus propiedades lubricantes iniciando procesos de oxidación formando gomas, lacas, herrumbre, lodos, para contrarrestar la formación de compuestos indeseables y mejorar el desempeño de las bases lubricantes se le adicionan aditivos, los cuales adecuadamente combinados brindan las características propias de cada aceite lubricante mejorando las propiedades físicas y químicas de los lubricantes extendiendo la vida útil del lubricante y las máquinas que los utilizan.

Las principales propiedades que debe tener un lubricante para proporcionar protección a las partes en movimiento de una máquina son: viscosidad, antidesgaste, estabilidad térmica, antiespumante, antiemulsibilidad, anticorrosividad, propiedades detergente, antiherrumbre, bajo punto de fluidez, dispersantes. Para mejorar estas propiedades se usan componentes químicos llamados aditivos.

La propiedad más importante de los lubricantes es su viscosidad, en este sentido y considerando la viscosidad de los aceites y sus aplicaciones, fueron clasificados los aceites lubricantes de acuerdo con su grado de viscosidad por organismos expertos en la materia.

En este sentido, la ISO VG, Organización para la estandarización internacional, definió los grados de viscosidad para los lubricantes industriales, norma ISO

3448. Bajo el estándar ASTM D2422, indicado por la palabra ISO VG seguido del número correspondiente al grado de viscosidad. El sistema ISO clasifica la viscosidad de los aceites industriales en cSt a 40°C. En la Tabla 4 se especifican los diferentes grados de viscosidad en el sistema ISO; los grados básicos de viscosidad están comprendidos entre el 2 y el 68, los siguientes grados ISO después del 68 se obtienen añadiendo uno o dos ceros a partir del 10 hasta llegar al 1500. El límite mínimo y máximo de un grado ISO es el 10% de dicho grado (Albarracín, 2007).

**Tabla 5. Clasificación de los aceites lubricantes industriales norma ISO 3448. Basado en Viscosidades a 40°C, cSt.**

<b>Grado de viscosidad</b>	<b>Viscosidad media</b>	<b>Viscosidad mínima</b>	<b>Viscosidad máxima</b>
2	2.2	1.98	2.42
3	3.2	2.88	3.52
5	4.6	4.14	5.06
7	6.8	6.12	7.28
10	10	9.0	11.0
15	15	13.5	16.5
22	22	19.8	24.2
32	32	28.2	35.2
46	46	41.4	50.6
68	68	61.2	74.8
100	100	90.0	110
150	150	135	165
220	220	198	242
320	320	288	352
460	460	414	508
680	680	612	745
1000	1000	900	1.100
1500	1500	1350	1.650

**Fuente:** ASTM D2442, Norma ISO 3448 -1975 (HANDBOOK of LUBRICATION, Theory and practice of Tribology, Volumen II, E. Richard Booser. CRC PRESS, Inc. Boca Raton, Florida. 1988).

Por otro lado, la SAE, Society of Automotive Engineers, definió el estándar para lubricantes para automotores (SAE J300) y aceites lubricantes para transmisiones (SAE J306) (Tabla 5). Esta clasificación de los aceites garantiza que a bajas temperaturas y cuando se arranque el motor, el aceite pueda acceder a las partes del motor que requieren lubricación (viscosidad máxima), así como garantizar que a altas temperaturas, se mantiene la película de aceite entre las partes móviles del motor. Los grados seguidos con la letra W (Winter en inglés) hace referencia a condiciones de arranque en frío, los especificados sin la letra W corresponden a condiciones de viscosidad mínima, para asegurar la lubricación en caliente. En la actualidad existen lubricantes para motor que cumplen ambas especificaciones y son llamados aceites multigrados.

**Tabla 6. Clasificación de aceites lubricantes para motor. Norma SAEJ300.**

Grado	Viscosidad a baja temperatura		Viscosidad a alta temperatura		
	Cranking, cP	Pumping, cP	Cinemática a 100°C, cSt		HSV a 150°C, cP
	máxima	Máxima	mínima	máxima	mínima
0W	3250 a -30	30000 a -35	3.8		2.4
5W	3250 a -25	30000 a -30	3.8		2.9
10W	3250 a -20	30000 a -25	4.1		2.9
15W	3250 a -15	30000 a -20	5.6		3.7
20W	3250 a -10	30000 a -15	5.6		3.7
25W	3250 a -5	30000 a -10	9.3		
20			5.6	<9.3	
30			9.3	<12.5	
40			12.5	<16.3	
50			16.3	<21.9	
60			21.9	<26.1	

Por último aparece la clasificación AGMA (American Gear manufacturers Association) que define 9 rangos de viscosidades de aceites industriales para engranajes (ver Figura 6).

**Tabla 7. Clasificación de aceites lubricantes para engranajes, clasificación AGMA.**

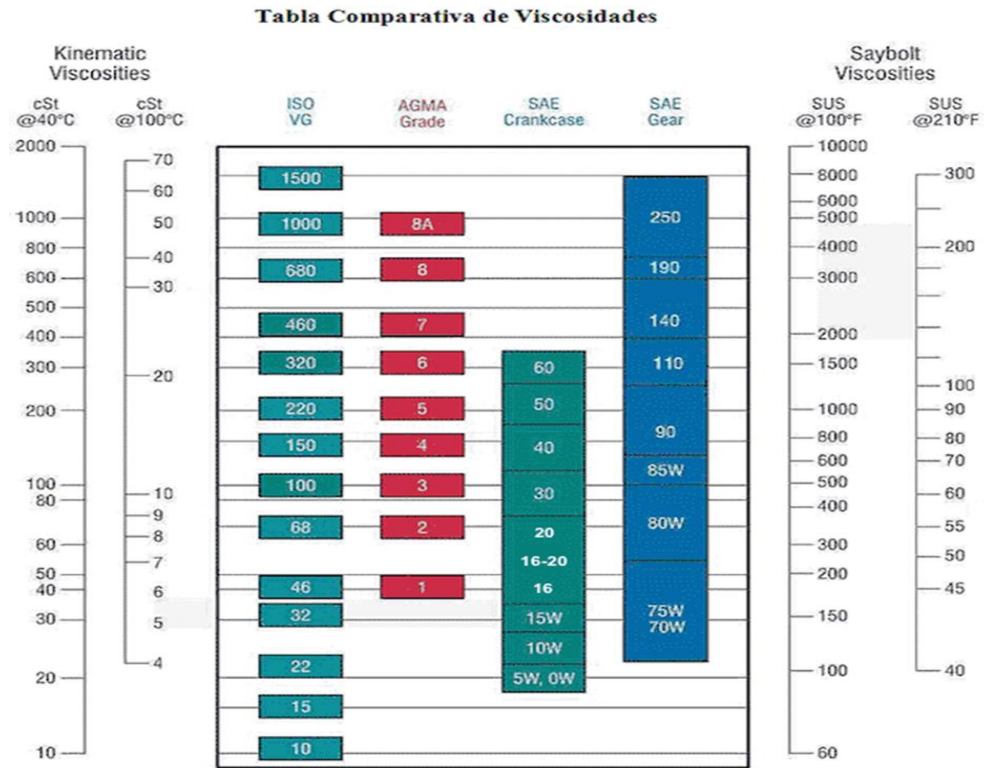
NUMERO AGMA	GRADO DE VISCOSIDAD ISO
1	46
2, 2 EP	68
3, 3 EP	100
4, 4 EP	150
5, 5 EP	220
6, 6 EP	320
7 COPM. 7EP	460
8 COMP, 8EP	680
8A COMP	1000

**Fuente:** SHELL Company. Fundamentos de lubricación.

Los aceites industriales del que trata este documento de aplicación deben cumplir con el estándar ISO 3448 que los clasifica en función de su viscosidad a 40°C. La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) estableció desde 1975 el sistema ISO para especificar la viscosidad de los aceites industriales. El sistema ISO clasifica la viscosidad de los aceites industriales en cSt a 40°C, mediante un número estándar que se coloca al final del nombre del aceite industrial. Este sistema reduce las posibilidades de que el usuario se equivoque en la selección del aceite a utilizar o que mezcle lubricantes de diferentes viscosidades; facilita además hallar de manera inmediata el equivalente en viscosidad de un aceite con otro puesto que el nombre del aceite debe traer al final el grado ISO correspondiente.

En la Tabla 7 se realiza una comparación entre las diferentes clasificaciones de los lubricantes.

**Tabla 8. Comparación de los grados de viscosidad definidos por los diferentes organismos internacionales que normalizan los lubricantes.**



Fuente: WIDMAN ISO sea [en línea] disponible en: <http://www.widman.biz/Seleccion/iso-sae.html>

**1.4.2 Los aditivos** Los aditivos son sustancias químicas sintéticas que se agregan en pequeñas cantidades a una base lubricante, de modo que el lubricante terminado tenga las características necesarias para cumplir con las especificaciones requeridas en las distintas aplicaciones en máquinas y equipos. Los aditivos para bases lubricantes se agrupan en tres grandes categorías.

### **1.4.2.1 Aditivos que modifican las propiedades de los lubricantes**

**1.4.2.1.1 Depresores de punto de fluidez:** Los aceites que contienen hidrocarburos parafínicos tienden a formar cristales de cera a baja temperatura, incrementando el punto de fluidez del lubricante, este fenómeno es indeseado donde el lubricante trabaja temperaturas bajas debido a que incrementa la resistencia a fluir del lubricante. Los depresores de fluidez son polímeros de alto peso molecular el cual inhibe la formación de cristales de cera y permite que el aceite fluya a bajas temperaturas. Están fabricados a partir de fenatos y silicatos.

**1.4.2.1.2 Mejoradores de índice de viscosidad:** Los mejoradores de índice de viscosidad son compuestos orgánicos (polisobutenos, polimetacrilatos, copolímeros de olefinas) que tienen largas cadenas moleculares. A bajas temperaturas, estas se encuentran plegadas sobre sí mismas y por lo tanto no modifican apreciablemente la viscosidad del aceite base. En cambio, medida que la temperatura aumenta las cadenas se van desplegando restringiendo la fluidez del aceite lo cual tiende a compensar su caída de viscosidad. Un lubricante debe tener baja sensibilidad a la variación de la viscosidad con la variación de temperatura, es decir que tenga un alto índice de viscosidad.

**1.4.2.1.3 Modificadores de fricción:** En algunas aplicaciones se requiere que exista una gran diferencia entre los coeficientes de fricción estático y dinámico entre piezas que alternativamente entran en contacto y están lubricadas por aceite (por ejemplo: frenos húmedos, embragues, etc.). En otras en cambio se requiere que la diferencia entre ambos coeficientes sea mínima (por ejemplo: cajas sincronizadas, bancadas de máquinas herramientas, etc.). Los modificadores de fricción son compuestos que permiten en cada caso lograr las características óptimas requeridas.

### **1.4.2.2 Aditivos que protegen al lubricante**

**1.4.2.2.1 Antioxidantes:** Cuando un lubricante entra en contacto con aire tiende a oxidarse, con una cierta velocidad que depende básicamente de las características del aceite y de la temperatura a la que se expone. Además, este proceso puede ser acelerado si hay contacto con algunos metales (cobre e hierro) que actúan como agente catalítico, o bien por presencia de contaminantes en el aceite como el agua, suciedad y partículas que contiene el aire. Las reacciones de oxidación conducen a una degradación progresiva del aceite con formación de compuestos solubles (ácidos débiles) e insolubles (lodos, lacas, depósitos carbonosos). Este tipo de aditivos disminuye la velocidad de oxidación, reduciendo la tendencia de los hidrocarburos a combinarse con las moléculas de oxígeno, y por consiguiente reducen la tendencia a corroer los materiales sensibles de los rodamientos de las máquinas. Están hechos a base de aminas o compuestos fenólicos.

**1.4.2.2.2 Antiespumantes:** Cuando se agita un aceite en presencia de aire, se forma una cierta cantidad de espuma, que acelera los procesos de oxidación y reduce la efectividad de la lubricación. Los antiespumantes son compuestos, generalmente a base de siliconas, que reducen la tensión superficial de las burbujas facilitando su ruptura.

### **1.4.2.3 Aditivos que protegen a las superficies de trabajo**

**1.4.2.3.1 Anticorrosivos:** La presencia de ácidos débiles (orgánicos), y ácidos fuertes (inorgánicos) en los aceites puede dar lugar a un desgaste corrosivo de las superficies metálicas. Los anticorrosivos son compuestos solubles que impiden la corrosión ya sea neutralizando los ácidos o manteniéndolo en suspensión, es decir evitando que tomen contacto con las superficies.

**1.4.2.3.2 Anti-desgaste:** Los aditivos anti desgaste son compuestos de distinta naturaleza química ( ácidos orgánicos polares, tiofosfatos de Zinc, etc. ) cuyas cadenas se adhieren y se orientan perpendicularmente a las superficies metálicas con relativa facilidad, formando así una película delgada que resiste el cizallamiento y provee una efectiva lubricación límite bajo condiciones de cargas moderadas.

**1.4.2.3.3 Anti-herrumbre:** Los lubricantes son propensos a contaminarse con agua proveniente del contacto con el aire principalmente, esto provoca la herrumbre de las aleaciones ferrosas. Los anti herrumbre son compuestos (generalmente ácidos orgánicos) que previenen la formación de herrumbre evitando de distintas formas que el agua tome contacto con el metal, por ejemplo: reaccionando con las superficies o bien formando una película protectora. Normalmente es aplicado en aceites que se trabajan en rodamientos, ejes de turbinas de vapor, engranajes.

**1.4.2.3.4 Dispersantes:** En muchas aplicaciones el lubricante entra en contacto con contaminantes que son insolubles en el aceite, los cuales se aglomeran junto con los productos de oxidación y forman depósitos sobre las superficies metálicas. Estos depósitos pueden afectar el correcto funcionamiento de los mecanismo y eventualmente bloquear conductos de lubricación y o filtros. Los dispersantes son compuestos orgánicos polares, que previenen esta aglomeración manteniendo los productos insolubles en suspensión como partículas finamente divididas. De este modo, se mantiene la limpieza de las superficies de trabajo y se prolonga la vida útil de las máquinas.

**1.4.2.3.5 Extrema presión:** Bajo condiciones de carga muy severas se puede producir la microsoldadura o engranamiento de las aristas de la rugosidad superficial. Los aditivos extrema presión son compuestos a base de Cloro, Azufre y/o Fósforo que son muy estables a bajas temperaturas, pero que cuando se

produce una elevación de temperatura localizada por contacto incipiente metal con metal (por ejemplo, en la superficie del diente de un engranaje se podrían alcanzar rápidamente temperaturas del orden de 300°C) se descomponen y reaccionan con la superficie metálica formando compuestos de bajo punto de fusión (eutécticos) que evitan la soldadura.

La proporción de aditivos que se debe agregar a las bases lubricantes está definida por las características de esta y el uso del lubricante; generalmente están en el orden de 0.7% en peso (Ver anexo 1) en volumen máximo. Estos aditivos son suministrados por empresas reconocidas mundialmente como LUBRIZOL, CHEVRON, BRB de Holanda, SHELL, etc., compañías que han invertido años de investigación y desarrollo para la producción de aditivos que actualmente se distribuyen como paquete de aditivos el cual contiene mejoradores de las propiedades de los lubricantes de acuerdo con la aplicación del lubricante. Para la elaboración de lubricantes son estas empresas las que realizan las formulaciones de acuerdo con las propiedades de las bases lubricantes.

**1.4.3 Controles de calidad de los lubricantes industriales.** Una vez elaborado el lubricante se le deben realizar los controles de calidad que se le realizan a los aceites básicos y adicionalmente otros controles como:

**1.4.3.1 Punto de combustión (ASTM D-92):** El punto de combustión es la temperatura a la cual la combustión se mantiene, cuando se suministra una fuente de ignición. Normalmente, esta temperatura es superior a la de inflamación en más de 25 °C. El punto de inflamación indica si un producto arde con facilidad o no a temperatura ambiente, al entrar en contacto con una fuente o foco de ignición. Cuanto menor sea este valor para un líquido, mayor es el peligro de incendio. Este test se utiliza para determinar las condiciones de almacenamiento y operación, para evitar incendios y explosiones.

**1.4.3.2 Punto de anilina (Método ASTM D611):** Su objetivo es determinar el grado de aromaticidad de un líquido. Se determina por medio de la solubilidad completa en volúmenes iguales de anilina ( $C_6H_5NH_2$ ) y del líquido a analizar y se lee con la temperatura a la cual se alcanza la solubilidad completa. La solubilidad se incrementa con la temperatura y con el grado de aromaticidad de la muestra. Los hidrocarburos parafínicos son los menos solubles y por ello requieren mayor temperatura para su solubilidad. Los hidrocarburos nafténicos presentan una solubilidad intermedia entre los hidrocarburos parafínicos y los aromáticos. Un valor bajo del punto de anilina significa bajo índice de viscosidad y posibles daños en compuestos de cauchos o elastómeros, tales como sellos, que están en contacto con los aceites.

**1.4.3.3 Estabilidad a la oxidación (Método ASTM D943):** Es la facilidad del aceite a ser oxidado por el aire. Este proceso se intensifica con la temperatura, la humedad, óxidos metálicos, arcillas catalíticas, ácidos, etc. Como resultado de los procesos de oxidación de los lubricantes se forman productos que se disuelven en el aceite tales como ácidos y peróxidos y productos insolubles tales como resinas y lodos.

Los ácidos incrementan la corrosión de los equipos; las resinas se pueden pegar a la superficie y pueden causar obstrucciones y los lodos pueden causar taponamientos. Todo ello se traduce en mal funcionamiento de los equipos e incremento de los costos energéticos.

**1.4.3.4 Emulsibilidad (ASTM D-1601) y formación de espuma (ASTM D-892):** Es la facilidad de formar emulsión con el agua. Dentro de las operaciones para la producción de bases lubricantes se utilizan despojos con vapor y bajo algunas circunstancias es posible que trazas de agua se queden en el aceite. Bajo condiciones normales de refinación, esta agua se debe decantar al dejar la emulsión en reposo, pero si por alguna circunstancia el proceso de refinación no

ha sido el adecuado, quedan resinas que realizan la labor de un tenso activo y ello facilita la formación de emulsiones y las estabiliza. La presencia de agua se detecta por la opacidad de la muestra. Los aceites lubricantes para cárter de motor y para turbina no deben emulsionar el agua debido a que se desmejoran las propiedades lubricantes y se incrementa la velocidad de corrosión por oxidación.

Para evaluar la emulsibilidad se forma una emulsión de composición dada con agua por medio de la agitación a condiciones estándares de agitación, tiempo, temperatura, volumen y forma geométrica del recipiente. Se anota la cantidad de agua que se separa en el tiempo.

Para evaluar la formación de espuma se agita una muestra de aceite lubricante de 200 cm<sup>3</sup> con aire seco durante 5 minutos a una temperatura dada. Al final de la prueba se mide el volumen de espuma. Se deja la muestra en reposo durante 10 minutos y se vuelve a determinar el volumen de espuma para encontrar la estabilidad de la espuma.

**1.4.3.5 Aeroemulsión:** Es una emulsión formada por aire y aceite, en el cual el tamaño de las burbujas de aire es inferior al de las burbujas de aire en la capa superficial del aceite y se encuentran en el intervalo de  $10^{-4}$  y  $10^{-1}$  cm. Las aeroemulsiones van en detrimento de las cualidades lubricantes del aceite y se miden por el tiempo que tarda un volumen de aceite de un área dada en liberar el aire atrapado utilizando un procedimiento estándar.

**1.4.3.6 Tensión interfacial (ASTM D-971):** Es la tensión de la interfase de dos líquidos inmiscibles: aceite y agua. En la interfase, cada líquido tiene su tensión superficial y ella se puede reducir por contaminaciones o por oxidación. Este valor es importante para controlar la calidad de los aceites dieléctricos, aceites turbina y aceites de imprenta.

**1.4.3.7 Punto de Nube (ASTM D-25000):** Es la temperatura a la cual las parafinas presentes en el aceite inician su etapa de cristalización separándose del aceite en forma de sólidos, los cuales pueden obstaculizar el flujo del aceite y por lo tanto reducen la lubricación de los equipos.

**1.4.3.8 Viscosidad:** Las propiedades de flujo o viscosidad, es el parámetro clave para crear una lubricación eficiente, que es el concepto tomado en cuenta para el diseño de procesos de lubricación hidrodinámica y lubricación elasto-hidrodinámica. La viscosidad de los lubricantes es una propiedad física atribuida a los aceites bases, esta propiedad es una medida de resistencia interna de un fluido al desplazamiento; la unidad básica es el pascal-segundo. Esta resistencia es provocada por las fuerzas de atracción entre las moléculas del líquido. El esfuerzo necesario para hacer fluir el líquido (esfuerzo de desplazamiento) estará en función de esta resistencia. Los fluidos con alta viscosidad ofrecen cierta resistencia a fluir, mientras que los de menor viscosidad lo hacen con menos resistencia. La viscosidad se ve afectada por las condiciones ambientales, especialmente por la temperatura y en menor grado por la presión, y por la presencia de aditivos modificadores de la misma, que varían la composición y estructura del aceite.

Los valores de viscosidad frecuentemente reportados para un lubricante son la viscosidad a 40°C y a 100°C a presión atmosférica, el método para medir la viscosidad está definido por la norma ASTM D445. La viscosidad puede ser viscosidad cinemática y dinámica o absoluta.

La viscosidad cinemática se determina como el tiempo requerido para que un volumen de aceite fluya a través de un capilar a una temperatura dada. Se mide en un viscosímetro de capilar y se expresa en centistokes (cSt). Un cSt en el sistema internacional es igual a  $\text{mm}^2/\text{s}$ . Otra forma de expresar la viscosidad es en segundos Saybolt universales (SSU), los cuales se pueden medir en forma

directa o se determinan a partir de los cSt. La fórmula para calcular la viscosidad cinemática a partir de la viscosidad dinámica es:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Dónde:       $\mu$ : viscosidad dinámica  
                  $\rho$ : densidad

La viscosidad absoluta o dinámica  $\mu$  se observa, no en el límite de las fases sólida y líquida, sino dentro de toda la fase líquida, y es la medida de la fuerza tangencial necesaria para desplazar un plano paralelo de fluido sobre otro plano paralelo de fluido y se mide en un viscosímetro de rotación.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL.**

Diseñar conceptualmente una planta para la producción de lubricantes industriales ISO 32 e ISO 68 en la GRB.

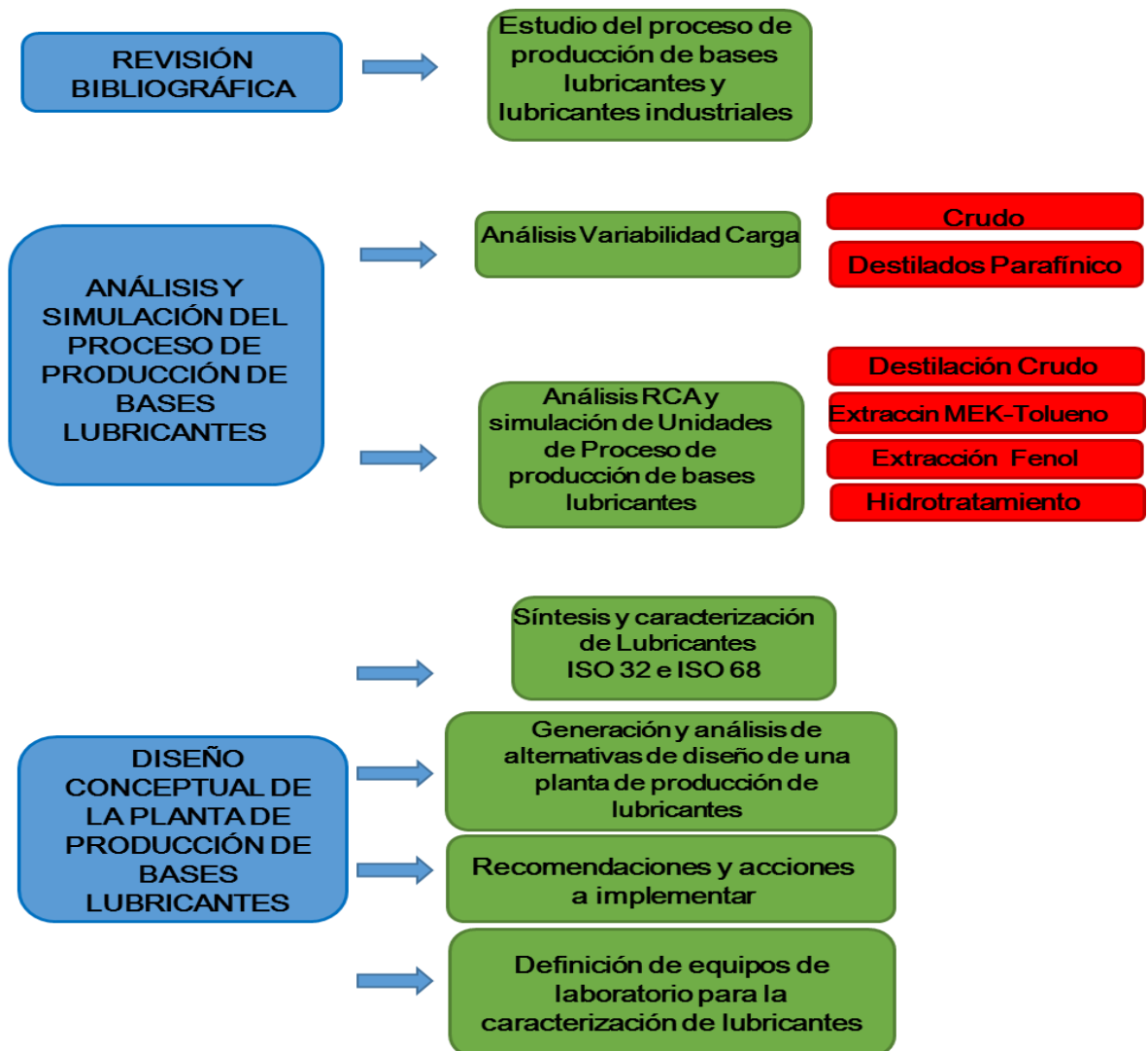
### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Sintetizar y caracterizar los lubricantes industriales ISO 32 e ISO 68.
- Generar alternativas de diseño de una planta de producción de los lubricantes ISO 32 e ISO 68 dentro de la Refinería de ECOPETROL S.A. ubicada en Barrancabermeja.
- Evaluar técnica y económicamente las alternativas generadas de la planta de producción de lubricantes.
- Proponer el diagrama de flujo del proceso de producción de los lubricantes ISO 32 e ISO 68 dentro de la GRB.
- Definir las tecnologías requeridas para la caracterización de los lubricantes en el Laboratorio Industrial de la GRB.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

En la figura 10 se muestra el esquema de la metodología empleada para el desarrollo del presente trabajo.

Figura 10: Esquema metodológico.



### **3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**

Inicialmente, se revisó toda la documentación relacionada con el proceso de producción bases lubricantes y lubricantes, y las especificaciones que deben cumplir particularmente los lubricantes ISO 32 e ISO 68 para aplicación en el sector industrial. Para ello se consultó manuales operativos, normas técnicas. Así mismo, se revisó el estado del arte acerca del tipo de formulación química que se está empleando en la actualidad para dicho fin.

### **3.2 ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BASES LUBRICANTES.**

**3.2.1 Análisis de variabilidad de la calidad de bases lubricantes con respecto a las características de la carga y parámetros críticos de calidad.** Teniendo en cuenta la variabilidad de las mezclas de crudo y, por ende, la poca estabilidad en mantener las bases lubricantes en condiciones estándares, se decidió llevar a cabo el análisis de la variabilidad de dichas mezclas antes del proceso de refinación así como de la composición del destilado parafínico producto de la refinación y que es alimentado posteriormente a la unidad de extracción con MEK/Tolueno. Por otro lado, se desarrolló un modelamiento que permitiera precisar calidades de crudo convenientes y condiciones destilación para asegurar una calidad de destilado parafínico lo más cercana a los parámetros estándar de las bases lubricantes. En este sentido, la simulación fue sometida a casos de estudios de variabilidad de proceso, como lo es carga de crudo, cambios de condiciones de reflujo de cima de los destilados parafínicos, cambios de carga de fenol y cambios de temperatura de hidrotatamiento, para definir parámetros que permitieran predecir condiciones de mezcla y aditivos de mezcla para alcanzar el lubricante adecuado, de acuerdo al estándar de lubricantes.

### **3.2.2 Análisis RCA y modelamiento de unidades de procesos de producción de bases lubricantes**

Así mismo, se realizó el análisis RCA y el modelamiento de las unidades de proceso involucradas en la producción de bases lubricantes, con objeto identificar posibles inconvenientes que se estuvieran presentando en cada una de ellas. Se generó un equipo interdisciplinario que involucró a operadores e ingenieros y se hizo un chequeo visual en la planta para determinar el estado actual de las causas-raíz del problema; se analizó la problemática, y tras una evaluación se dio paso a la priorización de causas-raíz en el estado actual. Posteriormente, se evidenciaron con datos reales e imágenes aquellas acciones que no habían sido implementadas, dándole importancia a su ejecución inmediata. Así mismo, se hizo una evaluación con base en los conocimientos adquiridos tanto en Ecopetrol como estudios previos universitarios de aquellas recomendaciones propuestas aún no evaluadas por los ingenieros para solucionar las desviaciones que afectan la calidad de las bases lubricantes.

En cuanto a la desarrollo de la simulación, a continuación se detalla la metodología empleada.

### **3.2.3 Recopilación de información para análisis y desarrollo de simulación.**

Inicialmente, se recopiló información bibliográfica sobre mezclas de bases lubricantes, preparación final de productos lubricantes, además de información clave como características y mezclas de crudos (Assay de crudos) para mayor rendimiento parafínico; sistemas de extracción de ceras y de componentes parafínicos clasificados para bases lubricantes; condiciones hidrotreatmento para asegurar estabilidad en los componentes, eliminar al azufre y disminuir la oxidación por compuestos nitrogenados y azufrados; entre otros.

De acuerdo con la disponibilidad de crudo de la refinería se tomó un promedio del último año de la calidad del crudo parafínico necesaria para la obtención del mayor rendimiento de ceras y bases lubricantes, y con ello establecer la carga de crudos

al simulador. Además, con el fin de analizar las desviaciones de proceso que pudieran afectar la calidad final de las bases lubricantes, desde enero a agosto de 2016 (ambos inclusive), se monitorearon las diferentes corrientes en flujo y composición, de los procesos involucrados en la producción de bases lubricantes, es decir, el proceso refinación de crudo para obtener destilados parafínicos, la extracción de ceras con MEK y Tolueno, la extracción de bases lubricantes con Fenol, y el hidrotratamiento catalizado para remoción de moléculas pesadas azufradas como tiofenos, diolefinas y demás.

**3.2.4 Desarrollo de la simulación de los procesos** Desde el inicio el proyecto contemplaba realizar un diseño conceptual de una planta de producción de lubricantes ISO 68, pero teniendo en cuenta la variabilidad de las mezclas de crudo y, por ende, la poca estabilidad en mantener las bases lubricantes en condiciones estándares, se decidió desarrollar un modelamiento que permitiera precisar calidades de crudo convenientes y condiciones destilación para asegurar una calidad lo más cercana a los parámetros estándar de las bases lubricantes.

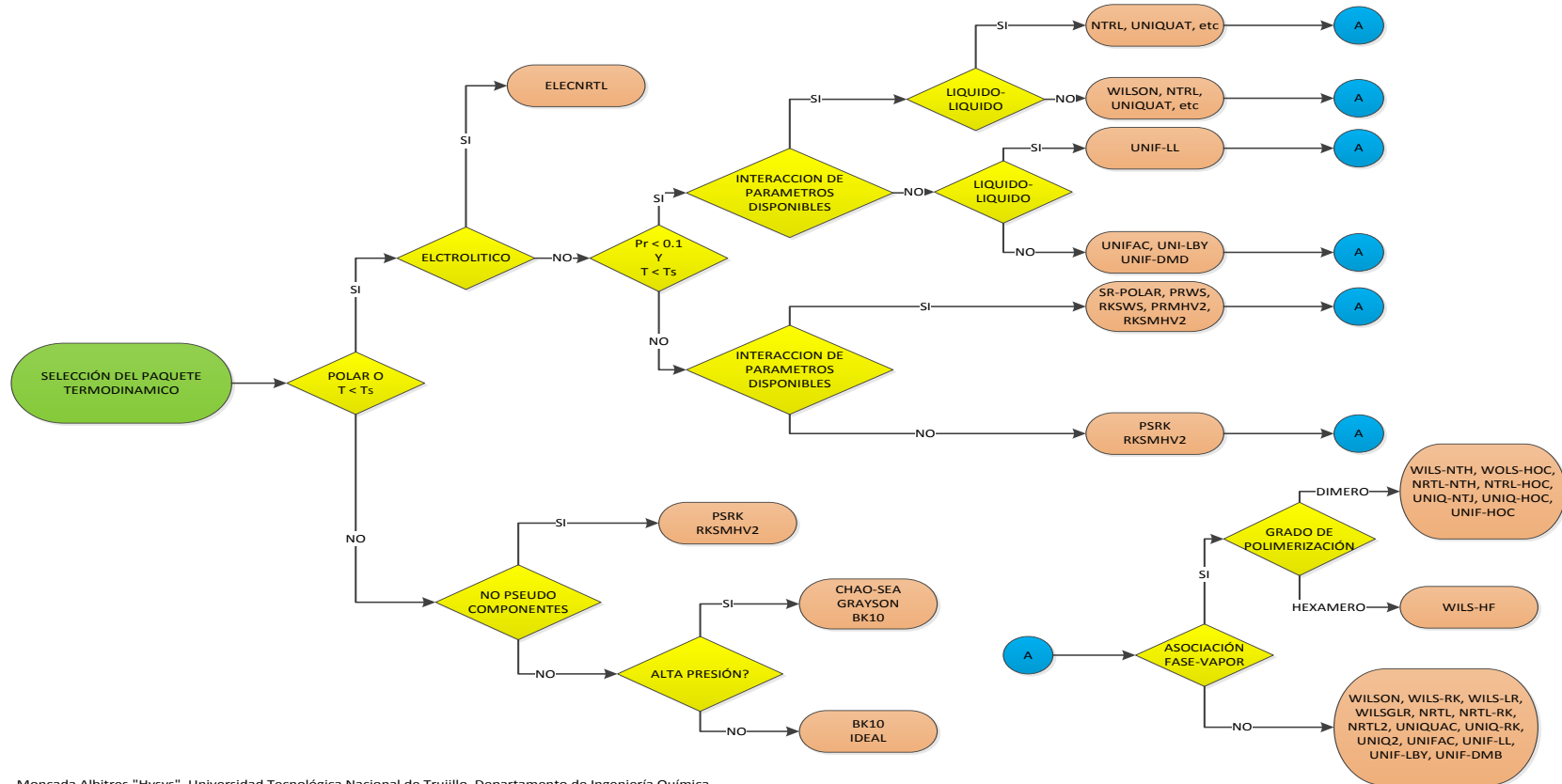
**3.2.4.1 Selección de los paquetes termodinámicos.** Inicialmente, se realizó el suministro de datos de composición y propiedades de los crudos que componen la mezcla de crudo parafínico al simulador. Después se procedió a determinar el(los) modelos termodinámicos adecuado(s) para dicha simulación. Para el caso de simulación de refinación se utilizó el paquete termodinámico de *Graysson Streed*, recomendado por ASPENTECH; para los procesos de extracción líquido-líquido se empleó el paquete termodinámico NTRL con gas real; y para el caso del proceso de hidrotratamiento catalizado se utilizó el paquete termodinámico de HCRSRK. Para precisar la selección de cada paquete termodinámico se presentan la Figura 11 y la Tabla 8, donde se muestran las recomendaciones de cada uno de los paquetes para sus respectivos procesos.

**Tabla 9. Recomendaciones para selección de modelos termodinámicos.**

<b>Tipo de proceso</b>	<b>Paquete Termodinámico recomendado</b>
<b>Deshidratación de TEG</b>	PR
<b>Acuoso ácido</b>	Sour PR
<b>Procesamiento de gas criogénico</b>	PR, PRSV
<b>Separación de aire</b>	PR, PRSV
<b>Torres atmosféricas de crudo</b>	PR y sus variantes, Grayson Streed (GS)
<b>Torres a vacío</b>	PR y sus variantes, GS, Braun K10, Esso
<b>Torres de etileno</b>	Lee Kesler Plocker
<b>Sistemas con alto contenido de H<sub>2</sub></b>	PR, Zudkevitch-Jofee (ZJ), GS
<b>Reservorios</b>	PR y sus variantes
<b>Sistemas de vapor</b>	ASME Steam, Chao Seader, GS
<b>Inhibición de hidratos</b>	PR
<b>Productos químicos</b>	Modelos de actividad, PRSV
<b>Alquilación de HF</b>	PRSV, NRTL
<b>Hidrocarburos-agua (alta solubilidad del agua en HC)</b>	Kabadi Danner
<b>Separación de hidrocarburos</b>	PR, SRK
<b>Aromáticos</b>	Wilson, NRTL, UNIQUAC
<b>Hidrocarburos sustituidos (cloruro de vinilo, acrilonitrilo)</b>	PR, SRK
<b>Producción de éter (MTBE, ETBE, ter-amil metil eter TAME)</b>	Wilson, NRTL, UNIQUAC
<b>Plantas de etilbenceno / estireno</b>	PR, SRK O Wilson, NRTL, UNIQUAC (según la tecnología de producción)
<b>Producción de ácido tereftálico</b>	Wilson, NRTL, UNIQUAC
<b>Planta de amoníaco</b>	PR, SRK

**Fuente:** Honeywell, ASPENTech

Figura 11. Flujo para selección de paquete termodinámico.



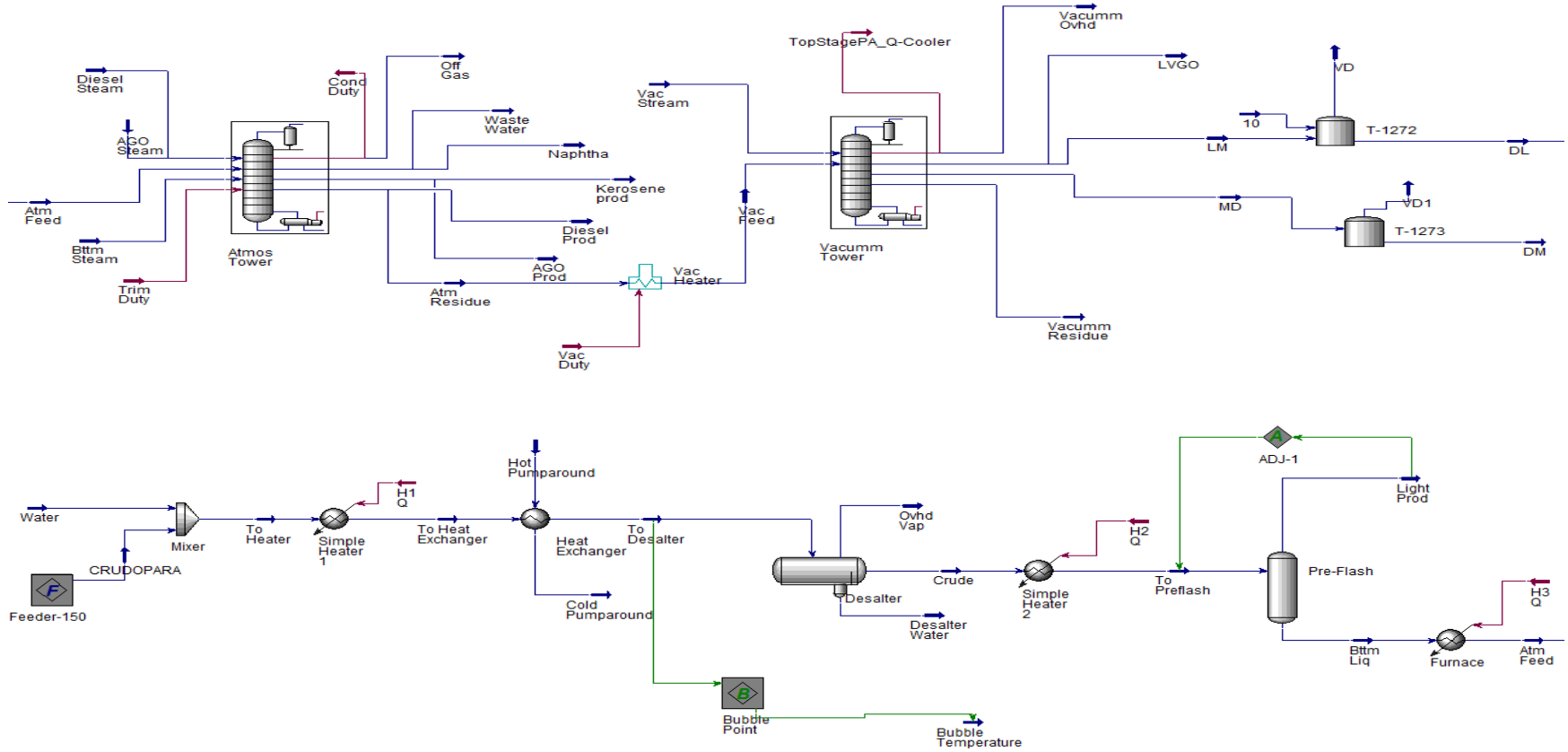
Moncada Albitres."Hysys". Universidad Tecnológica Nacional de Trujillo. Departamento de Ingeniería Química.

Fuente: MONCADA Albitres. "Hysys. Universidad Tecnológica Nacional de Trujillo. Departamento de Ingeniería Química

**3.2.4.2 Simulación de la unidad de refinación de crudo parafínico (CDU)** Esta simulación incluyó el sistema de desalado de crudo, la unidad de prefraccionamiento, la torre de destilación atmosférica y la torre de destilación al vacío. Esta última es donde se obtienen los destilados parafínicos que contiene en gran proporción ceras y bases lubricantes. Se simuló las torres de acuerdo con el diseño en planta, con los platos requeridos, los reflujos medio e inferior, para llegar a la mayor similitud del proceso y reproducir en lo posible los resultados reales de calidad de los destilados parafínicos. Para determinar la aceptación de la simulación de producción de los destilados parafínicos liviano y medio, se realizó una comparación de la composición y flujo, densidad y viscosidad (ver figura 12).

**3.2.4.3 Simulación de la planta de extracción de ceras utilizando tolueno y MEK** Se seleccionó el paquete NRTL extendido con gases y líquidos en condiciones reales, ya que fue el más recomendado y de mayor aceptación de resultados en los procesos de extracción líquido-líquido. Para este caso se tomaron los destilados producidos de la etapa anterior y se llevaron al proceso de mezclado y enfriamiento; posteriormente, el producto se envió al sistema de retiro de cera, para dejar los aceites y lubricantes preparados para ser tratados en la unidad de extracción de lubricantes. Para determinar la similitud de la simulación frente al proceso real, se tomaron como parámetros de calidad de los destilados lubricantes, la viscosidad a 40 y 100°C, la destilación de acuerdo con la ASTM D86, la densidad y la gravedad API, principalmente. Después de lograr los resultados de acuerdo a los parámetros de calidad, se revisó de igual forma que los resultados de la simulación de esta etapa estuvieran dentro del rango de variabilidad de los resultados de calidad del laboratorio (ver figura 13).

Figura 12. Simulación de la unidad de destilación de crudo parafínico.



**3.2.4.4 Simulación de la planta de extracción de bases lubricantes utilizando fenol** Al igual que en el apartado anterior se seleccionó el paquete NRTL extendido con gases y líquidos en condiciones reales, recomendado para los procesos de extracción líquido-líquido. Para este caso se tomaron los resultados de los destilados producidos, además de evaluar el contenido de material lubricante extraído por el fenol, para después pasar al sistema de destilación de recuperación de fenol, y dejar los aceites y lubricantes preparados para ser tratados en la Unidad Hidrotratamiento de Lubricantes para remoción de H<sub>2</sub>S (ver figura 14).

**3.2.4.5 Simulación de la unidad de Hidrotratamiento de bases lubricantes** Para este caso se escogió el paquete termodinámico desarrollado para hidrotratamiento (HCRSRK). Inicialmente, se modeló el horno de acuerdo con las especificaciones de diseño; posteriormente el reactor, teniendo en cuenta las características del catalizador y las cinéticas hidrotratamiento expuestas por el fabricante, especificando el hidrógeno de reciclo, la purga de gases y la temperatura de hidrotratamiento. De acuerdo con el manual de la planta se chequeó que el producto cumpliera con las condiciones de punto inicial y punto final de ebullición. Para determinar la similitud de la simulación frente al proceso, se tomaron parámetros de calidad de las bases lubricantes como viscosidad a 40 y 100°C, densidad, contenido de azufre, gravedad API, entre otros (ver figura 15).

Figura 13. Simulación unidad extracción de ceras y producción de Aceite desparafinado usando MEK-Tolueno.

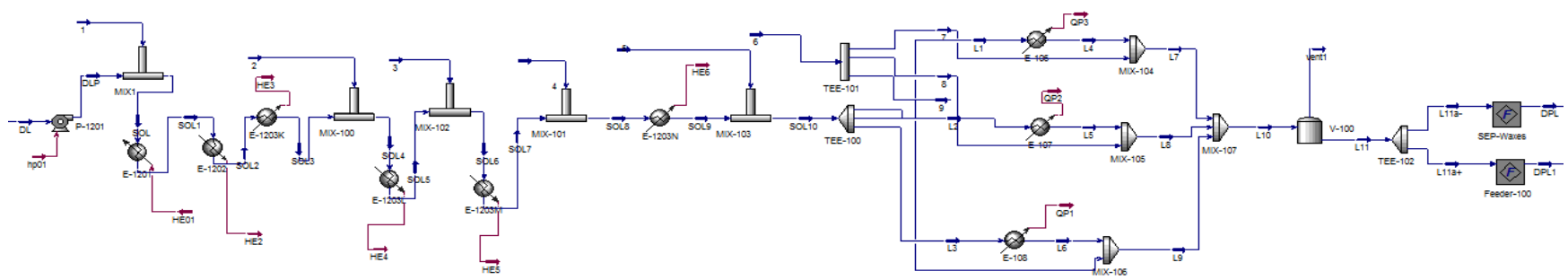
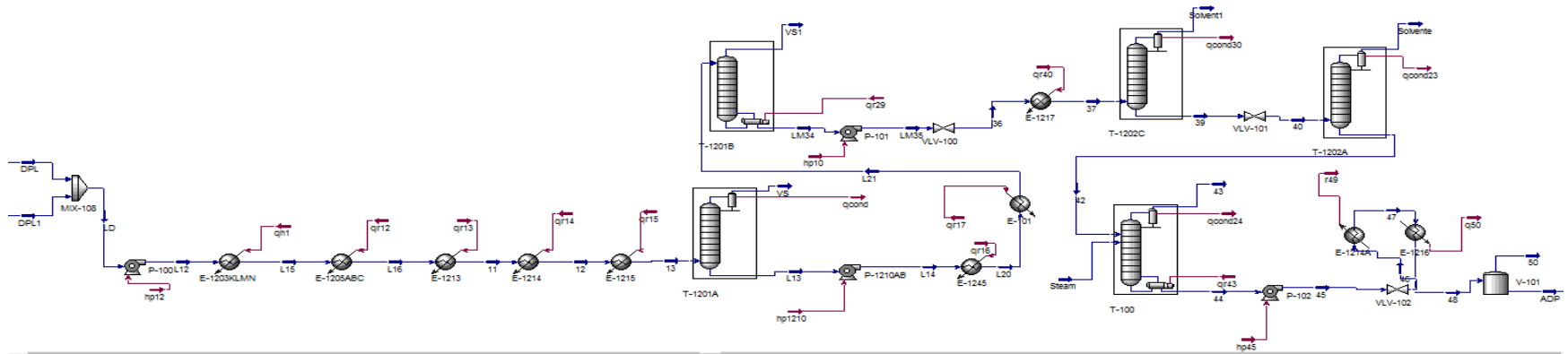


Figura 14. Unidad de extracción de lubricantes con Fenol.

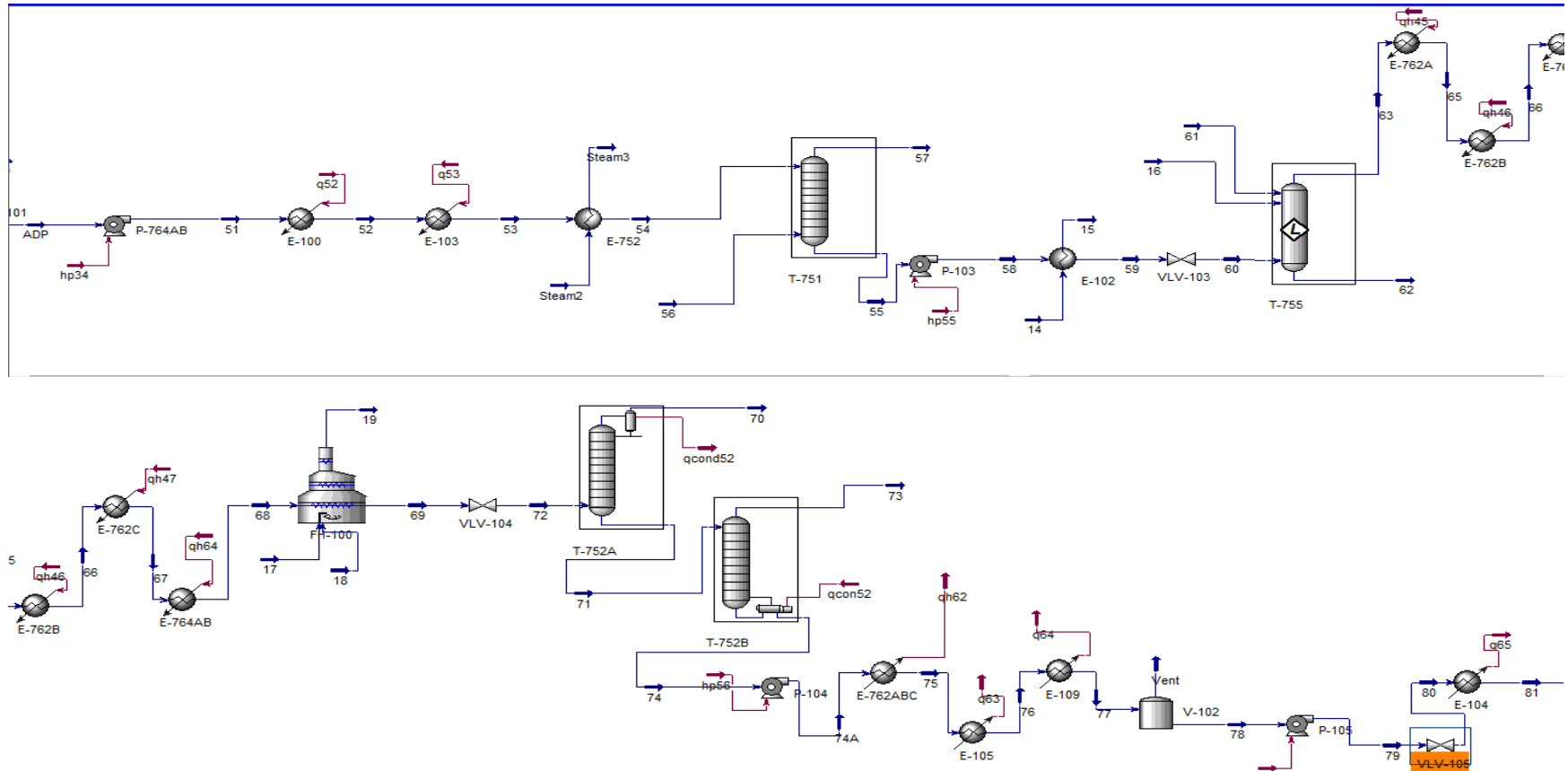
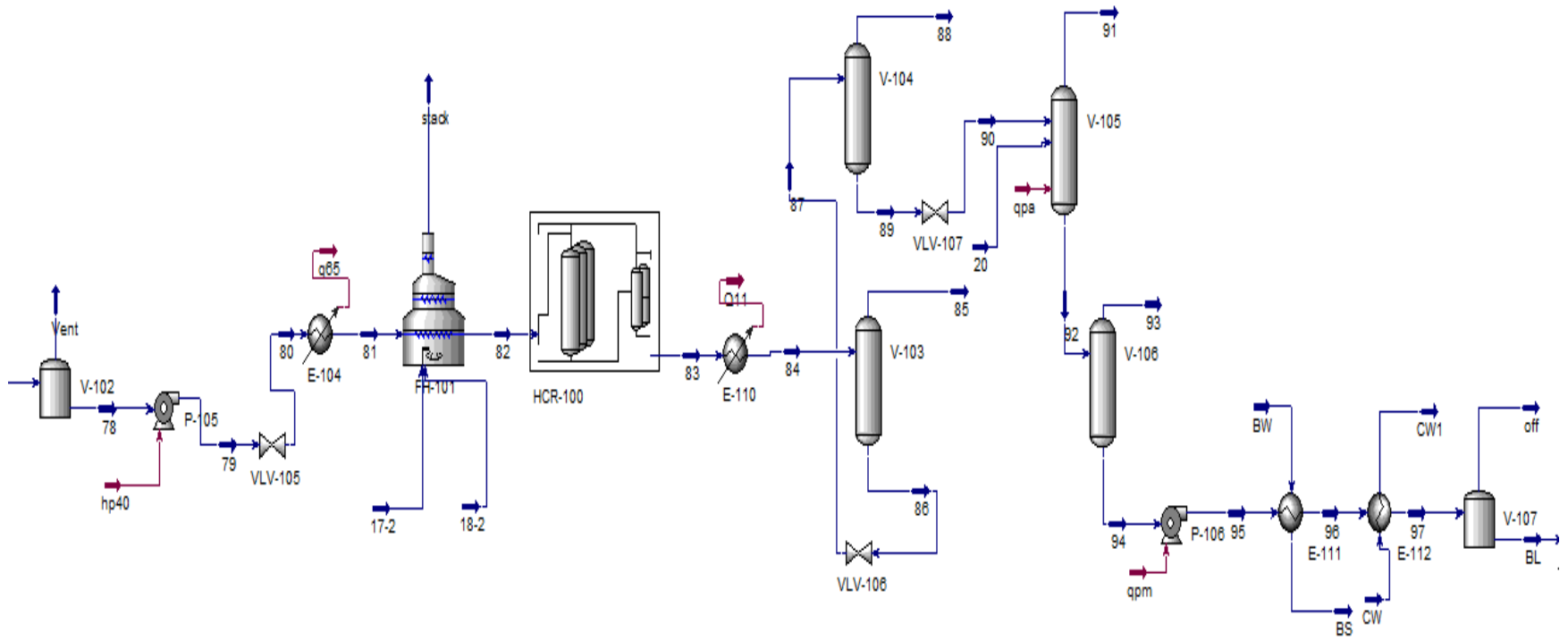


Figura 15. Unidad de Hidrotratamiento de bases lubricantes para remoción de azufre como H<sub>2</sub>S



### **3.3 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BASES LUBRICANTES**

**3.3.1 Síntesis y caracterización de los lubricantes** Se realizó un análisis especializado de las bases lubricantes producidos dentro del Departamento de Parafinas y Fenol. Este análisis se llevó a cabo en el Laboratorio Industrial de la Refinería de Barrancabermeja de ECOPETROL S.A. Posteriormente, las muestras de bases lubricantes fueron enviadas a una casa matriz para formulación de los lubricantes. Con la formulación recomendada por el fabricante, se realizó la síntesis de los lubricantes a escala de laboratorio en la GRB para, a continuación, llevar a cabo la caracterización de los mismos, en la cual se determinó los siguientes parámetros: viscosidad cinemática (a 40 y 100 °C), índice de viscosidad, punto de fluidez e inflamación, capacidad antiespumante, número TAN, contenido en agua y corrosión a lámina de cobre. La caracterización se realizó tomando como base la normativa ASTM para cada uno de los ensayos.

**3.3.2 Generación y análisis de alternativas de diseño de una planta de producción de lubricantes** Durante la generación de alternativas de diseño de la planta de producción de los lubricantes ISO 32 e ISO 68, se identificaron las necesidades, recursos y equipos necesarios, para dicho diseño. Así mismo, se procedió a inventariar los equipos y recursos disponibles dentro en el Departamento de Parafinas y Fenol, que pudieran ser empleados durante el diseño de la planta y que permitan descartar o, por el contrario, potenciar la viabilidad de ciertas alternativas con respecto a otras. En este sentido, se tuvo en cuenta además la posibilidad de adecuación de ciertos sistemas o unidades para este propósito. Dentro de esta etapa se llevó a cabo el estudio de factibilidad técnico-económica de cada una de las alternativas de diseño generadas durante la etapa anterior, de acuerdo a las necesidades de la GRB, y recursos y equipos disponibles en el Departamento.

**3.3.3 Recomendaciones y acciones a implementar** Con base en dicho análisis, se establecieron recomendaciones específicas que serán presentadas a la Gerencia de la Refinería para el aprovechamiento de equipos y adecuación de ciertas líneas o sistemas destinados para la construcción de la planta de producción del lubricante.

**3.3.4 Definición de equipos de laboratorio para la caracterización de los lubricantes** De forma complementaria y con objeto de establecer un control de calidad en el proceso de producción, se definieron qué equipos adicionales se requieren en el Laboratorio Industrial de la GRB para la caracterización de lubricantes, con base en las normas internacionales para la caracterización y control de calidad.

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BASES LUBRICANTES.

**4.1.1 Análisis de variabilidad de la calidad de bases lubricantes con respecto a las características de la carga y parámetros críticos de calidad** De acuerdo con la disponibilidad de crudos con carácter parafínico de Ecopetrol, el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) realizó en 2007 un estudio de las posibles alternativas de carga, (Instituto Colombiano del Petróleo 2007) con el propósito de garantizar la calidad de los destilados y fondos de vacío. Para ello utilizó el esquema parafínico (Desparafinado y Extracción Líquido-Líquido) en las plantas pilotos con los crudos provenientes de los campos de producción de petróleo Cupiagua, Cusiana, Tibu-Zulia, HCT, Caño Limón, Floreña, San Francisco y Rancho Hermoso. Teniendo en cuenta la disponibilidad de los crudos y los resultados de rendimiento y calidad de las bases lubricantes y ceras, se destaca que de acuerdo con el resultado de este estudio, los crudos mencionados se puede incluir en la dieta de carga a la unidad de crudo hasta el 10% de crudo Cusiana, debido a que un volumen mayor de este crudo en la mezcla de carga al esquema parafínico genera bases lubricantes con índice de viscosidad por debajo de 95. En cuanto al crudo Caño Limón en mezcla con crudo Cupiagua puede ser admitido máximo un 12% para obtener buenos rendimientos de bases y cumplir con la calidad de las mismas. En conclusión las mezclas de crudos recomendadas para la obtención de bases lubricantes son:

- ✓ Cupiagua 90%- Cusiana 10%
- ✓ Cupiagua 88%- Caño Limón 12%
- ✓ Cupiagua 80%- HCT 20%
- ✓ Cupiagua 60%- Floreña 40%

Los demás crudos mencionados y que no aparecen en las mezclas relacionadas pueden incluirse en la dieta parafínica ya que arrojaron altos rendimientos de bases lubricantes en las pruebas realizadas (ver Tabla 9).

Para el almacenamiento de los crudos relacionados anteriormente se cuenta sólo con un tanque de almacenamiento que recibe crudo parafínico por cuatro líneas de tuberías diferentes con crudos de densidad promedio (a 15°C) que oscila entre 920 y 820 kg/m<sup>3</sup> y una gravedad API que varía entre 40° y 29° (ver Figura 16, 17 y 18).

El tanque de almacenamiento de crudo parafínico, generalmente, se encuentra en recibiendo producto y entregándolo en simultáneo como carga a la unidad de destilación de crudos. Este esquema de almacenamiento y carga no permite asegurar una buena homogenización del tanque de almacenamiento de crudo parafínico, generando perturbaciones al proceso que afectan la calidad del destilado para la producción de la base lubricante. Adicionalmente, los crudos HCT, Cusiana y Caño Limón llegan al tanque de almacenamiento por baches, obteniendo mezclas de crudo que no permiten tener control de las proporciones de composición en volumen recomendadas por el estudio de crudos parafínicos del ICP para la obtención de bases lubricantes.

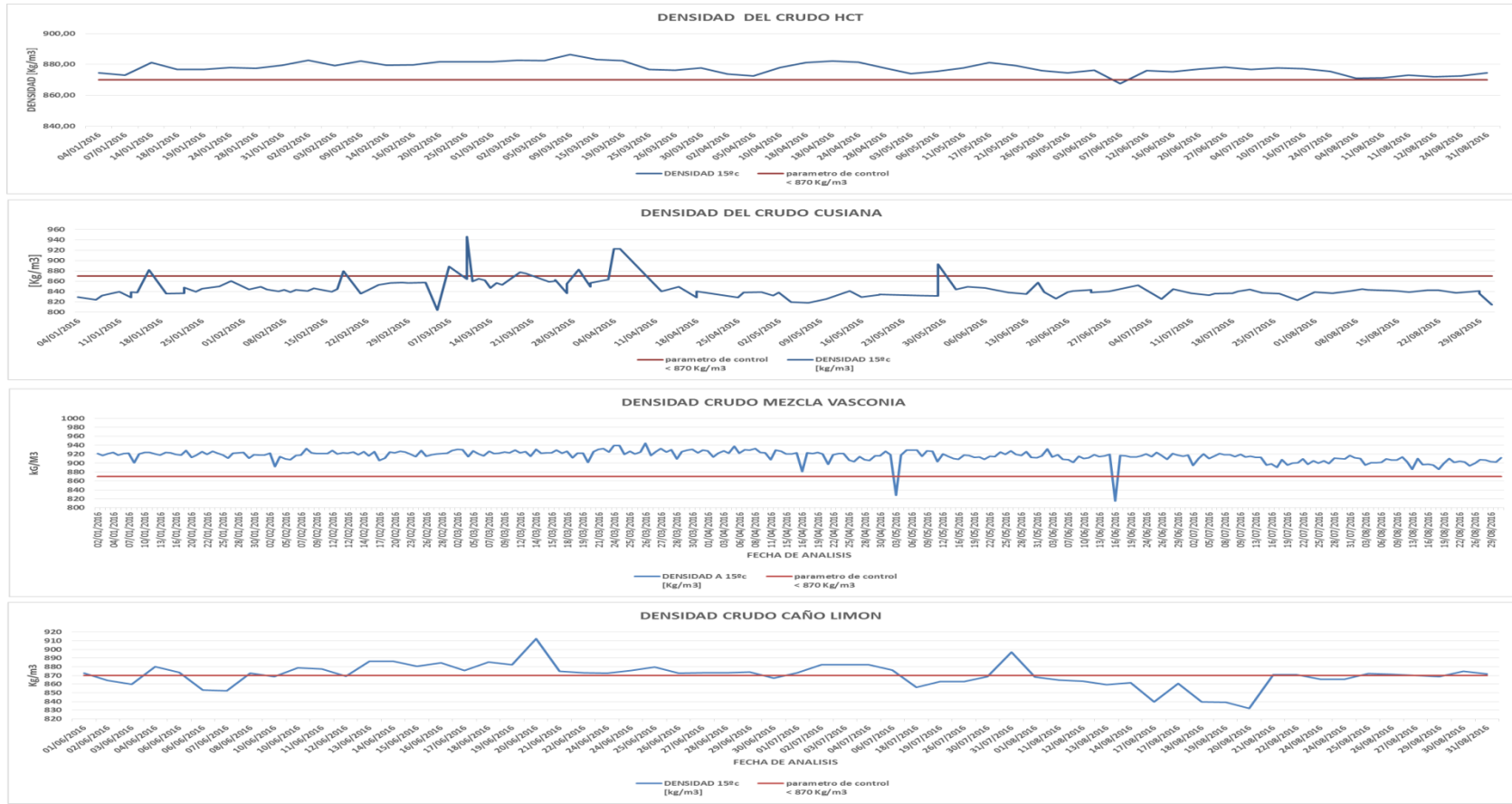
**Tabla 10. Resultado de la evaluación de los diferentes crudos de carácter parafínico en las plantas piloto del ICP.**

	HCT		CRUDO FLOREÑA		CRUDO RANCHO HERMOSO		CRUDO SAN FRANCISCO		CRUDO CUSIANA	
	D.L	D.M.	D.L	D.M.	D.L	D.M.	D.L	D.M.	D.L	D.M.
<b>RAFINATO</b>										
Rendimiento Destilado[%V]	66,7	66,3	48	50	69	62	53,5	60	67	71
Rendimiento Crudo [%V]	6	4,9	2,8	4,2	5,7	5,6	5,1	4,5		
<b>EXTRACTO</b>										
Rendimiento Destilado[%V]	33,3	36,4	52	50	31	38	46,5	40	44	30
Rendimiento Crudo [%V]	5	2,8	3	4,2	2,6	3,4	3,5	3,8		
<b>ACEITE</b>										
Rendimiento Refinado[%V]	64	73	54	60	62	54			54,6	53,4
Rendimiento Destilado[%V]	42,4	46,4	26,1	30	43	33,2	30,8	29,7	23,1	21,8
Rendimiento Crudo [%V]	6,37	3,62	0,7	1,26	2,5	1,9	2,51	2,9		
VI	93	90	102	103	96	92	92	90	84	80
Viscosidad 40 °C (cSt)	22,98	59,45	26,55	45,6	21,9	49,6	23,53	61,52		
Viscosidad 100 °C (cSt)	4,35	7,65	4,83	6,79	4,25	6,88	4,38	23,53		
Punto de Fluidez [°C]	-9	-9	-12	-12	-15	-12	-9	-6	-6	-8
<b>CERA</b>										
Rendimiento Refinado[%V]	18	21	34	34	31	34				
Rendimiento Destilado[%V]	11,8	13,1	16,4	17,5	21,7	21	12	12	18,7	19,2
Rendimiento Crudo [%V]	1,77	1,02	0,46	0,71	1,2	1,2				
Acetie [%m]	1,29	0,0045	0,03	0,17	0,47	0,2	0,47	0,35	0,8	0,5
Penetracion 25 °C [mm/10]	1,4	2,4	1,45	0,55	2,6	1,75				
Penetracion 38 °C [mm/10]	26,6	6,8	1,54	1,54	1,54	1,54	38,8	7,2	30	12

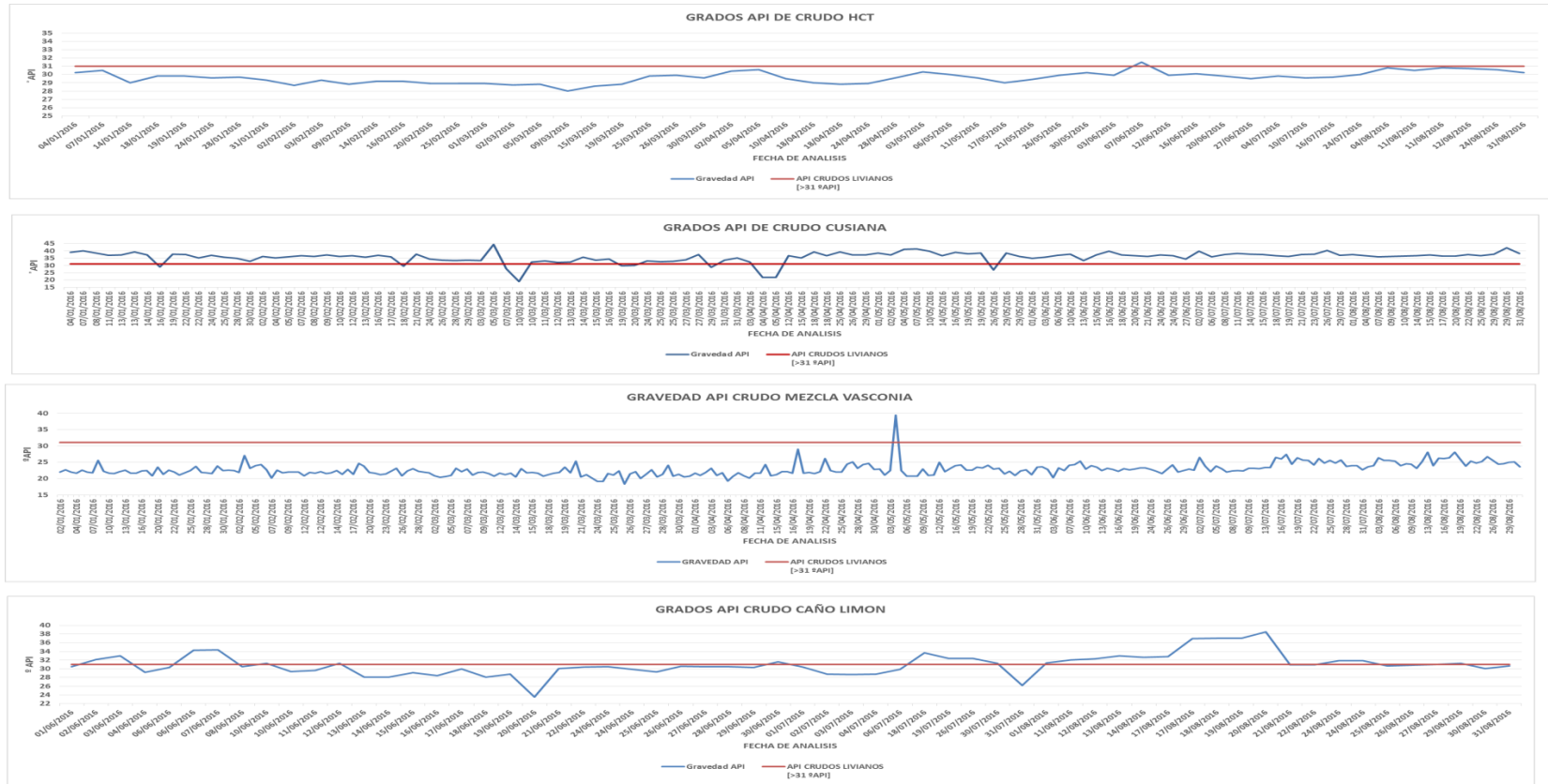
Nota: D.L.: Destilado Liviano, D.M.: Destilado Medio.

Fuente: ECOPETROL S.A.

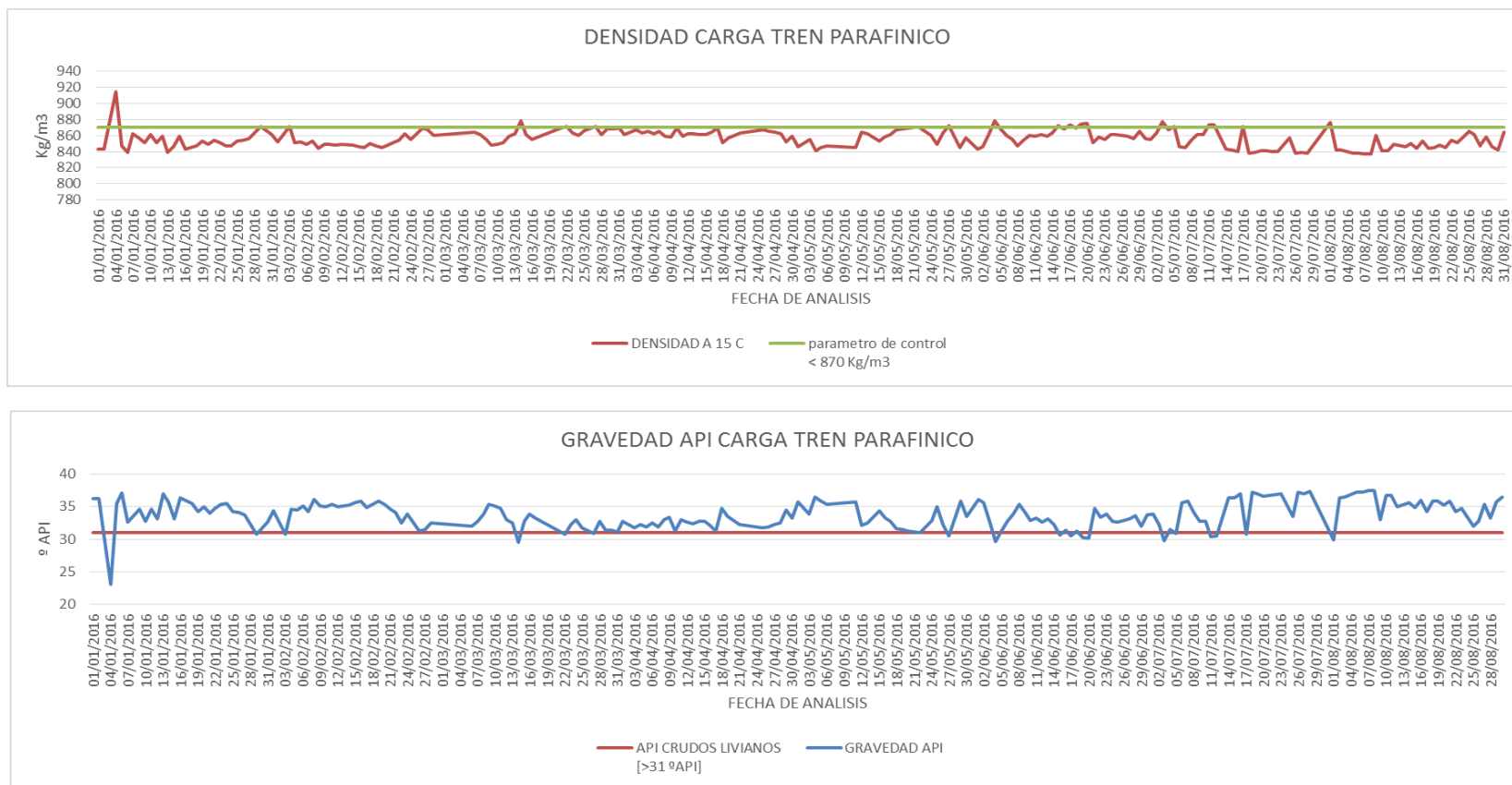
**Figura 16 Densidad de los crudos parafínicos cargados a la GRB.**



**Figura 17: Grados API de los crudos parafínicos cargados a la GRB.**



**Figura 18. Densidad y Grados API de los crudos cargados al tren de producción de bases lubricantes.**



## **4.2 ANÁLISIS RCA Y MODELAMIENTO DE UNIDADES DE PROCESOS DE PRODUCCIÓN DE BASES LUBRICANTES**

**4.2.1 Unidad de Destilación de Crudo** La Unidad de Destilación de Crudo procesa cargas con características parafínicas con destino a la producción de bases lubricantes y ceras. Esta unidad cuenta con una torre de destilación (torre preflash), una sección atmosférica y una de destilación a vacío. Tiene una operación estable y sus modos de operación no implican cambios significativos en los parámetros de control. Los principales ajustes en el modo de operación se relacionan con la calidad de la dieta de crudo, gravedad API, azufre y contenido de BSW (lodos, sedimentos y agua). De acuerdo a los cambios de estas variables se realizan ajustes de presión en el sistema atmosférico, temperaturas a la salida de los hornos, ajuste en reflujos de las torres.

Particularmente, la sección de destilación a vacío dispone de control avanzado de proceso que permite mantener la estabilidad operacional; sin embargo, por situaciones internas y externas del proceso, y para asegurar la continuidad operativa de esta unidad, las condiciones operacionales de temperatura del proceso en la sección de destilación al vacío han tenido variaciones, alcanzando temperaturas de hasta 750°F (398°C), versus las temperaturas de control de la corriente de carga hacia la sección de vacío para producir destilados en especificaciones que deberían estar entre 680°F (360°C) y 710°F (376.6°C), afectando la calidad de los destilados parafínico (figura 19). La alta temperatura en la torre de destilación al vacío hace que el rango de ebullición del destilado sea más amplio, obteniendo en éste, componentes pesados de carácter asfalteno que afectan el proceso de producción de bases lubricantes. En las figuras 20 y 21, se puede apreciar la variabilidad en la calidad de los destilados parafínicos Liviano y Medio obtenidos en la Unidad de Destilación de Crudo y que, posteriormente, son ingresados al tren de producción de bases lubricantes

Figura 19. Temperatura de operación de torre de destilación al vacío GRB, datos Enero a Agosto 2016.

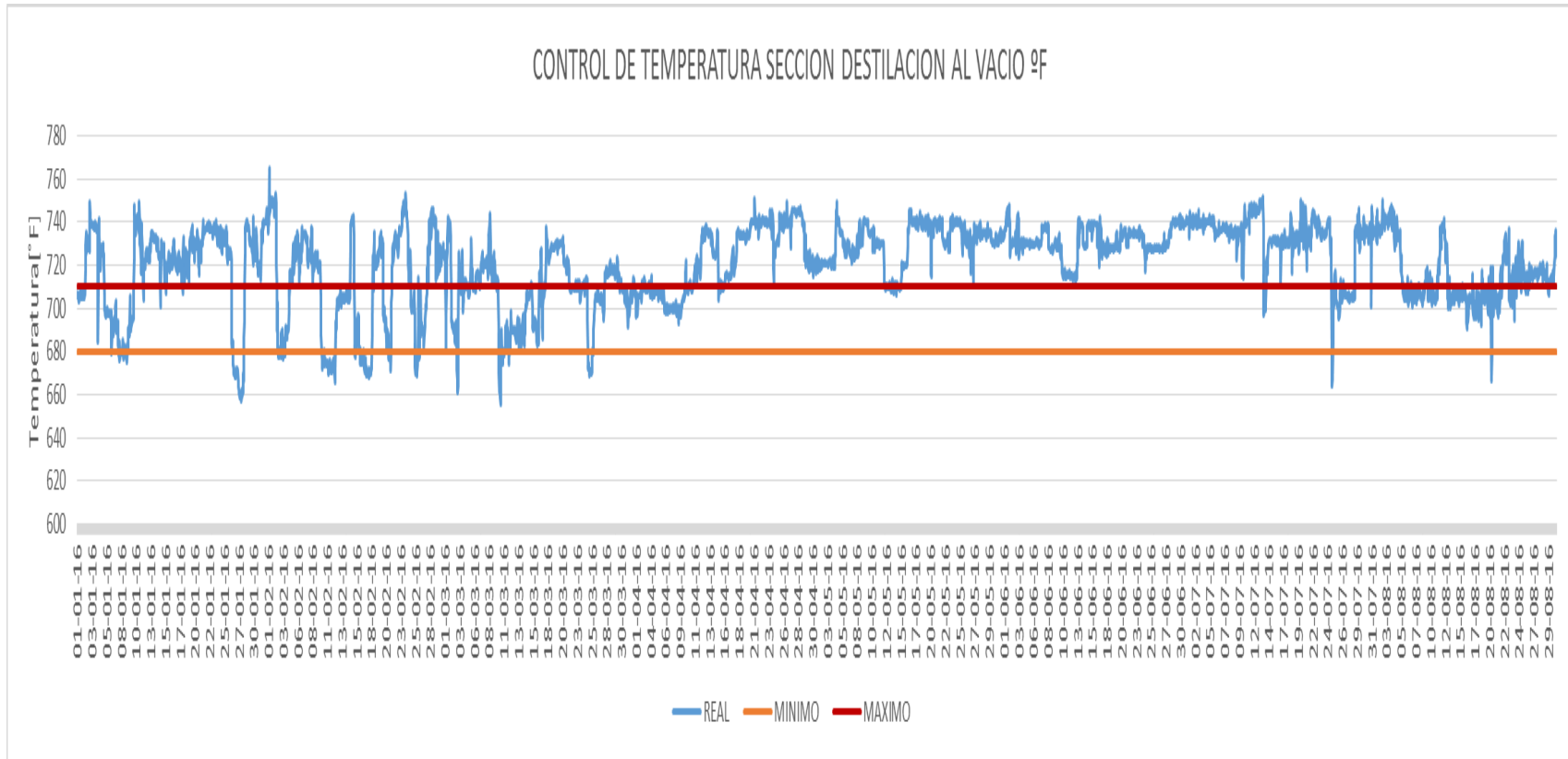


Figura 20. Datos de calidad del destilado parafínico Liviano.

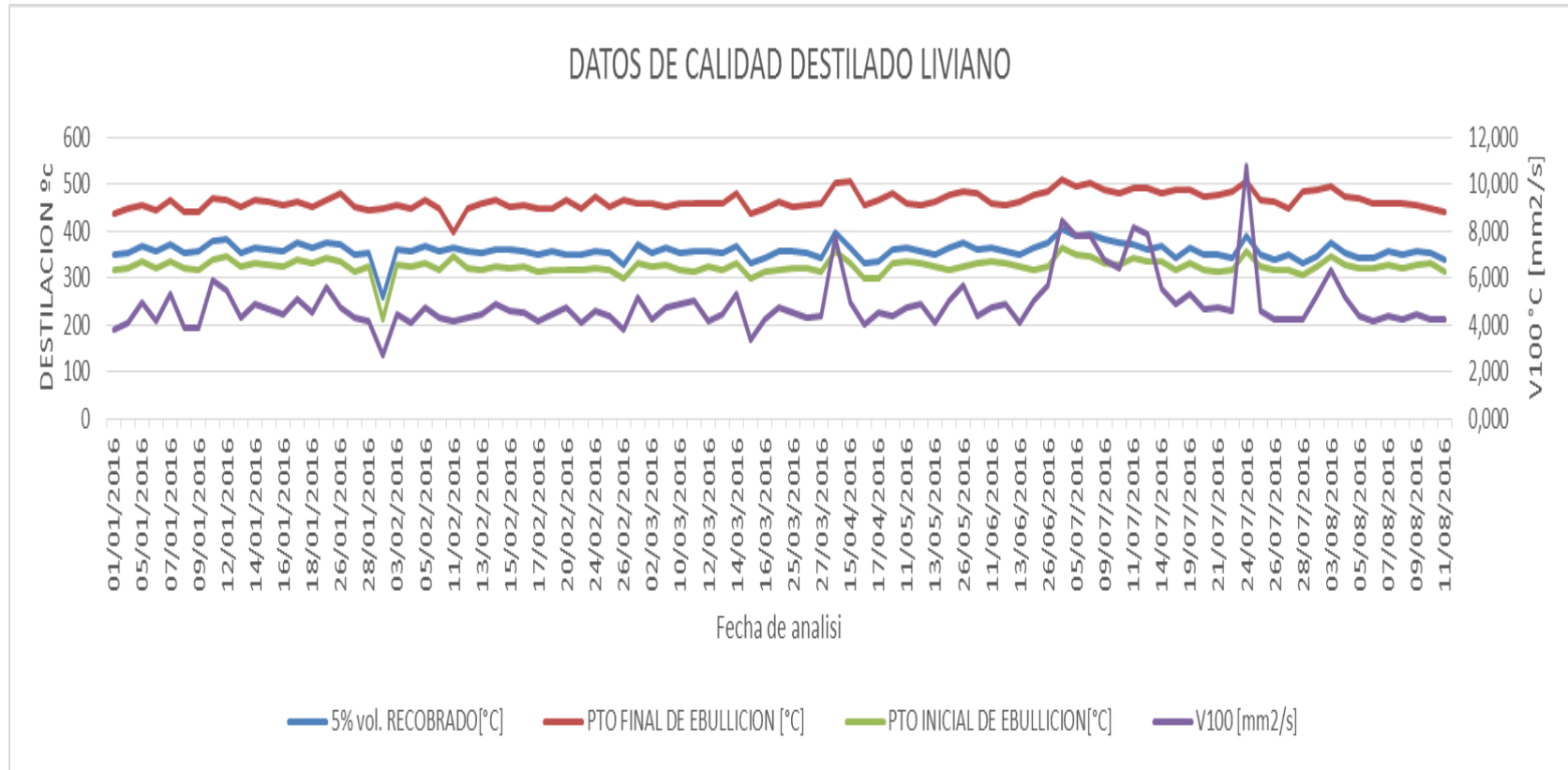
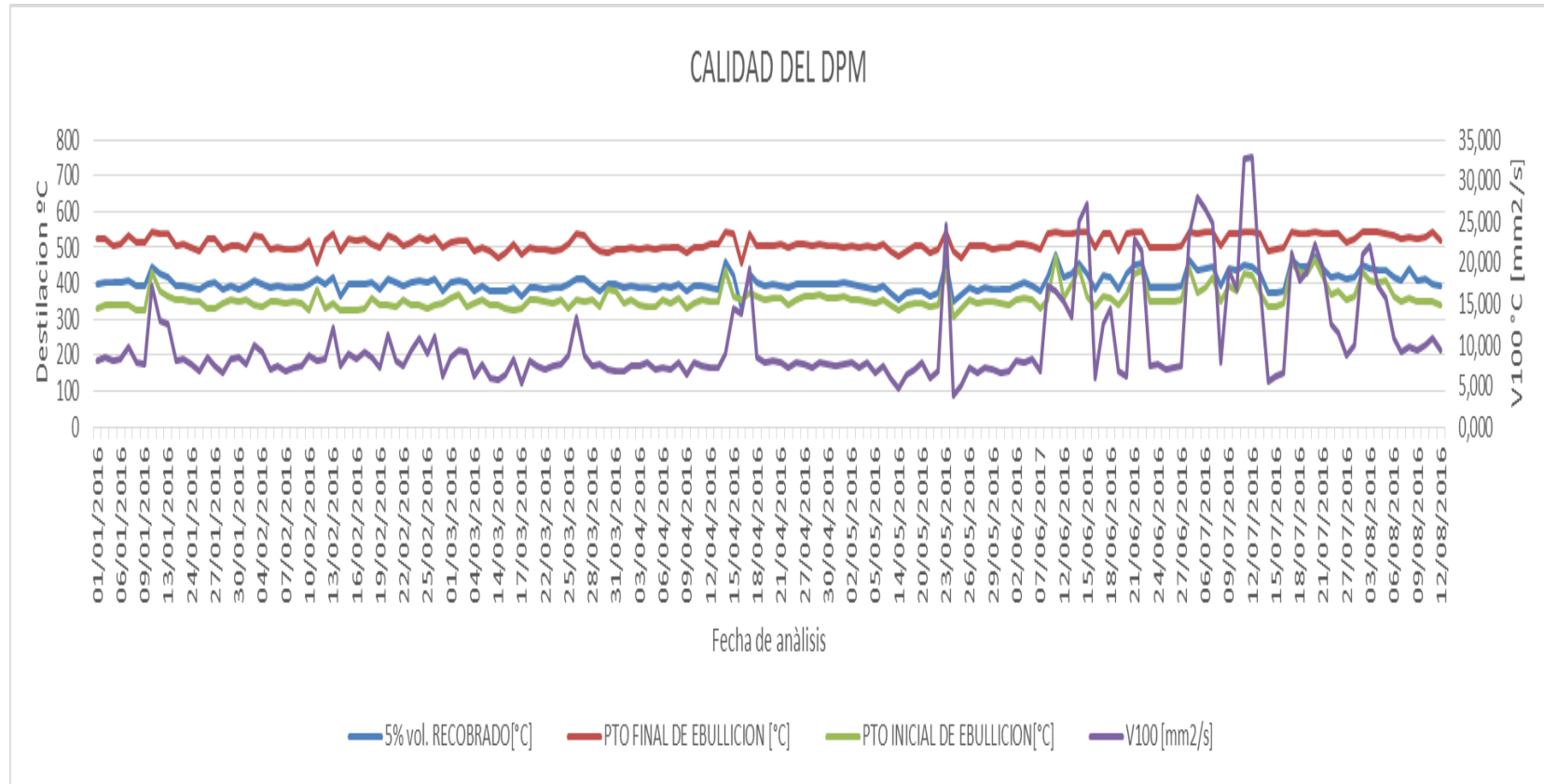


Figura 21. Datos de calidad del destilado parafínico Medio.



En las unidades para la obtención de la base lubricante, a saber, unidad de desparafinado con solvente, unidad de extracción líquido-líquido y unidad de hidrotratamiento, se han presentado inestabilidades operacionales principalmente por la presencia de componentes livianos y pesados con el destilado parafínico que afectan el proceso de separación del aceite de la parafina, obteniendo bases de bajo índice de viscosidad.

En este sentido, a continuación, se presenta el análisis de la operación de las unidades de proceso involucradas en la producción de bases lubricantes. Este análisis se inicia en la unidad de hidrotratamiento (etapa final) con el fin de analizar la calidad de las bases lubricantes e identificar los parámetros que se encuentran fuera de especificaciones. A partir de ello se analiza qué variables afectan el resultado final y se descarta o confirma si la afectación del producto se produce en esta etapa final.

**4.2.2 Unidad de hidrotratamiento de bases lubricantes** Para este análisis se recopilaron los resultados del análisis de calidad de laboratorio de la GRB en la aplicación llamada CDLAB de las corrientes bases lubricantes parafínicas, refinato y desparafinado. Estos análisis demuestran que las bases lubricantes no cumplen con el plan de calidad definido para entrega a clientes, en especial los parámetros de viscosidad 100 e índice de viscosidad (VI).

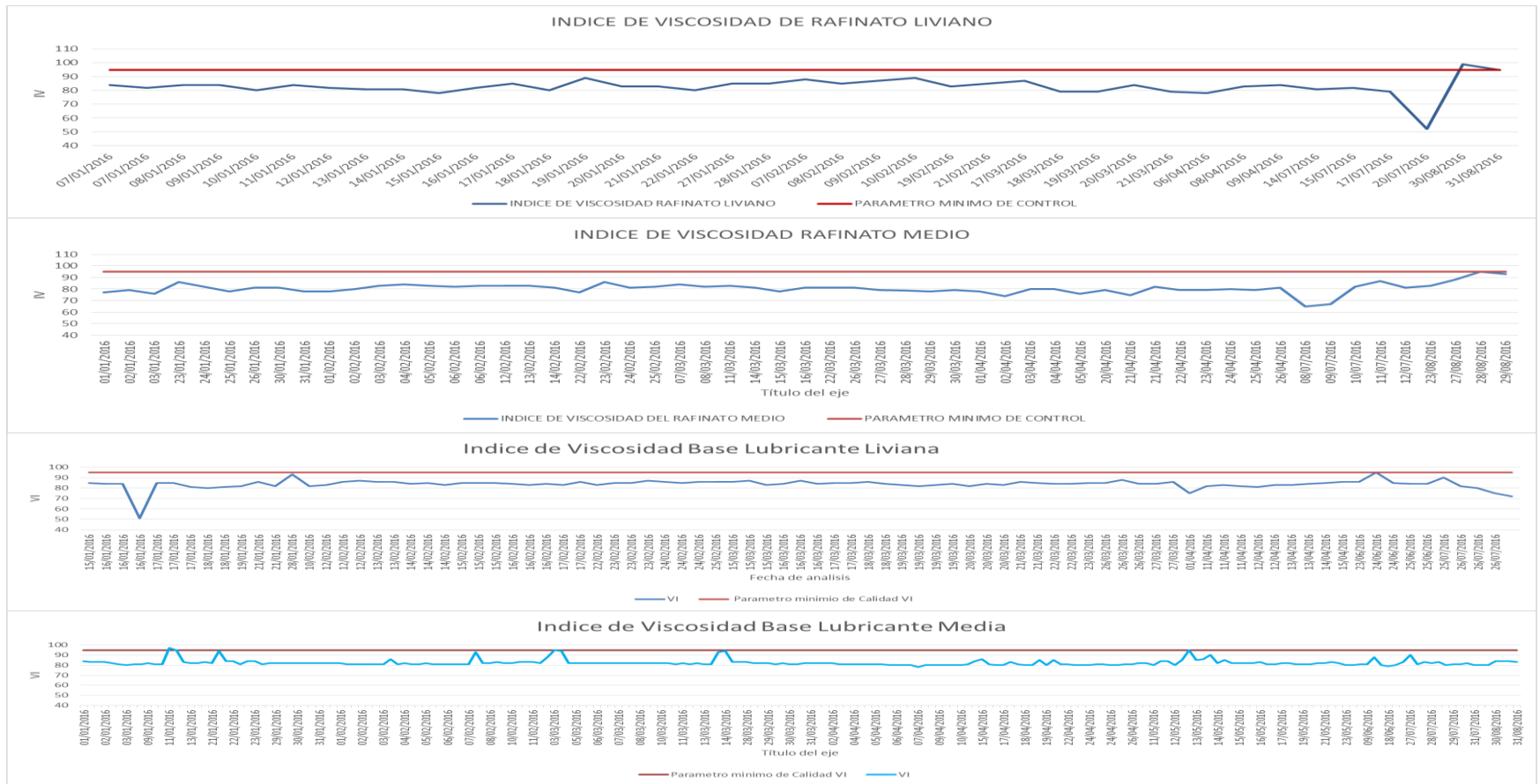
Para cumplir con este parámetro de calidad y mantener la participación de ECOPETROL S.A. en el mercado de bases lubricantes, se realizó un estudio de costo-beneficio para adquirir un aditivo mejorador de VI. Inicialmente, se consideró que de acuerdo con las dietas recibidas se obtendrían bases lubricantes con un valor de VI de alrededor de 92; sin embargo, como se observa en la figura 22, el índice de viscosidad de la bases ha estado en promedio situado en torno a valores de 85 (base liviana) y 81 (base media), por lo que la adquisición de este aditivo

hasta el mes de Agosto de 2016 ha sido de \$1.498.771.415, lo que prácticamente triplica el costo planeado para dicha adquisición (\$527.000.000).

Si se comparan los resultados de los análisis de los índices de viscosidad de la unidad de hidrotratamiento de las bases lubricantes y los del refinato procedente de la unidad de extracción líquido-líquido (figura 22) se observa que los valores de índice de viscosidad están por debajo de especificaciones antes incluso de la etapa de hidrotratamiento, proceso que no afecta de forma significativa la calidad del índice de viscosidad.

El hidrotratamiento tiene como objetivo mejorar el color y la estabilidad a la oxidación de la base lubricante mediante la remoción de azufre y compuestos nitrogenados; la afectación a las bases se ha dado básicamente por humedad en el producto final ocasionado por realizar despojo con vapor a presiones mayores a 20inHg. Esta desviación en la calidad de la base está identificada y asegurada mediante rondas frecuentes que realiza el operador del área a la presión de la torre tratadora y a la toma de muestra para apreciar su apariencia.

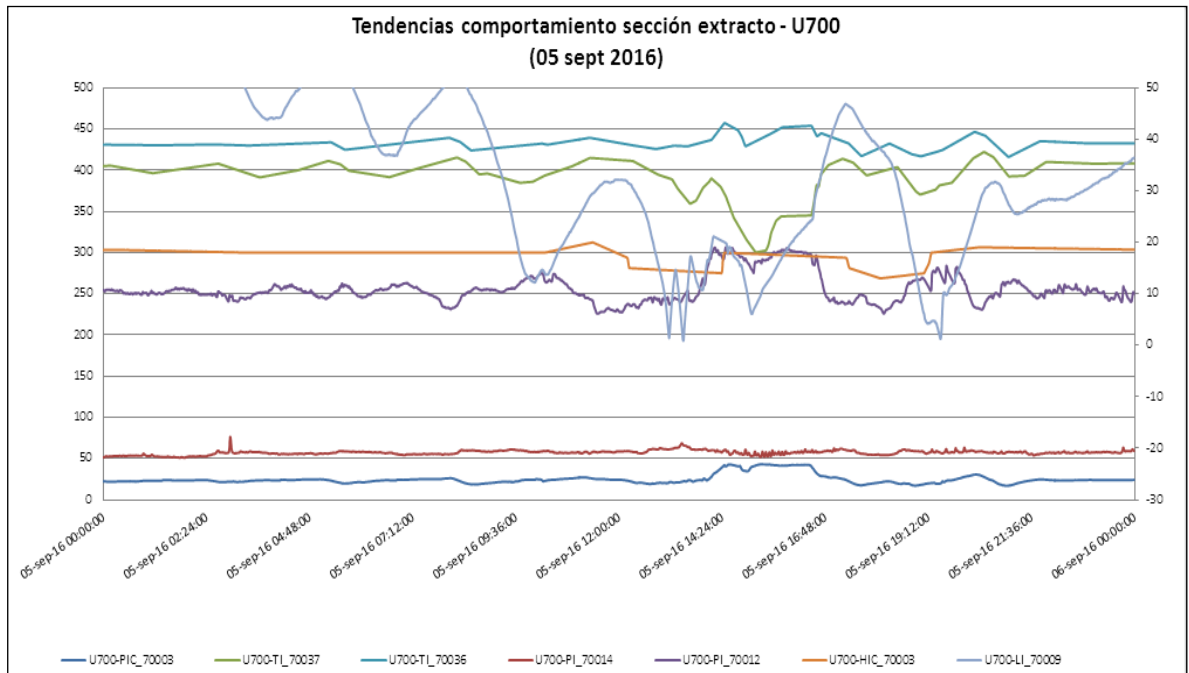
**Figura 22. Índice de viscosidad (VI) de las bases lubricantes y de los refinatos.**



**4.2.3 Unidad de extracción líquido-líquido con fenol** La unidad de extracción líquido-líquido emplea fenol como solvente para retirar selectivamente los componentes aromáticos del aceite desparafinado con el objetivo de incrementar el índice de viscosidad de las bases lubricantes. El producto de esta unidad es llamado Rafinato que actualmente, de acuerdo con los análisis de laboratorio, presenta un índice de viscosidad oscila entre 81 y 85, no cumpliendo con el plan de calidad establecido por ECOPETROL S.A. para su comercialización.

Durante la operación de la unidad de extracción con fenol en el transcurso de Enero a Agosto de 2016 se han presentado repetidos eventos de inestabilidad, los cuales se asocian a un comportamiento de disminución instantánea en las temperaturas de entrada de carga y fondo de la torre recuperadora de fenol en la sección de extracto, que debe ser 420°F (215°C), llegando en su punto más crítico a 300°F (149°C), temperatura para la cual la recuperación de fenol es muy baja, la figura 19 se aprecia el comportamiento de inestabilidad operacional de la U700, la tendencia identificada como U700-TI\_70037 indica la temperatura fondo torre de recuperación de fenol y la tendencia identificada como U700-LI\_70009 registra el nivel del tambor de solvente (Fenol), analizando estas dos tendencias se observa que ante un enfriamiento en la torre recuperadora de fenol afecta la recuperación de este (en la figura 23 se observa nivel de 0% de fenol), ocasionando paradas de la unidad.

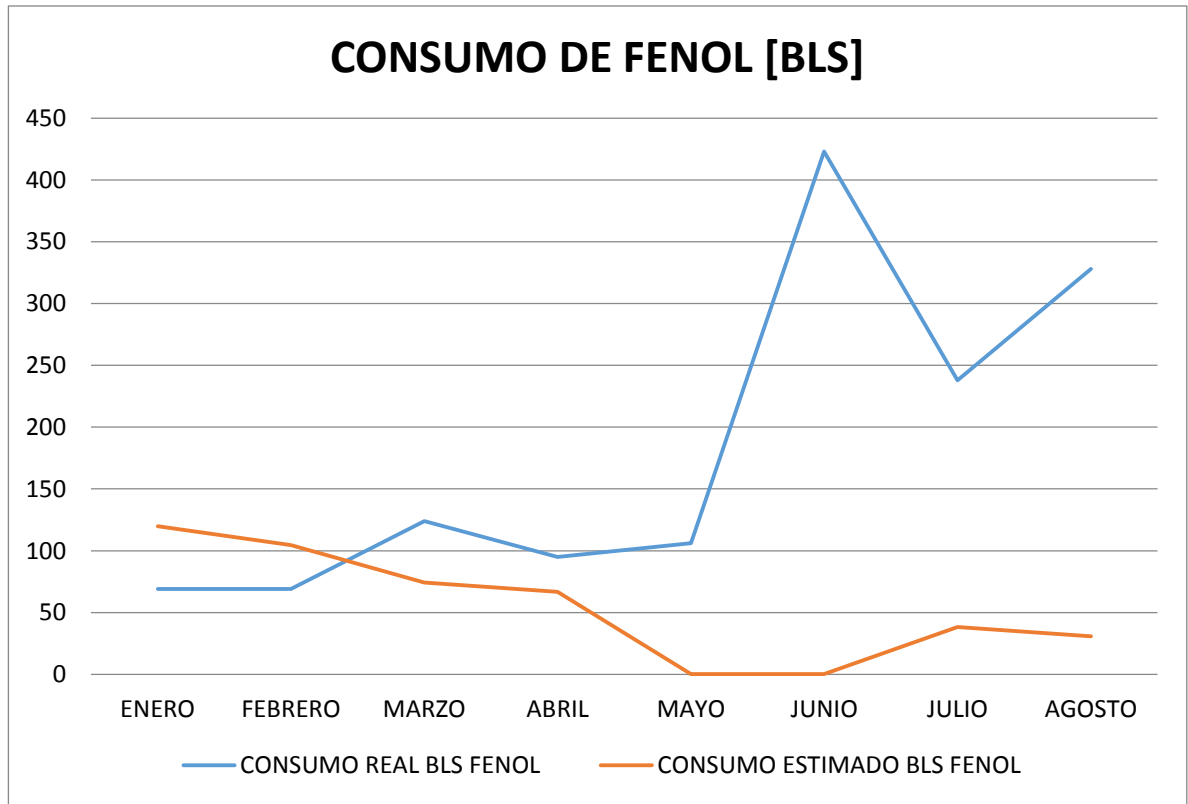
**Figura 23. Comportamiento de la operación en la sección de recuperación de fenol.**



Fuente: Tomado del análisis RCA realizado a la U700 (Fenol).

Ante estos repetidos eventos y en aras de reestablecer la operación, el técnico de consola procedió a realizar ajustes en las principales variables de operación y control de la sección de extracto; desafortunadamente, las acciones realizadas no fueron efectivas y, por el contrario, se requiere establecer circulaciones de unidad por largos periodos de tiempo y/o adicionar solvente (fenol) para mantener la unidad en operación. Por diseño, el consumo adicional de fenol es de 0,37 Kg por barril de carga; sin embargo, en la actualidad, y debido a las inestabilidades operacionales, el promedio de consumo se ha incrementado hasta 1,23 Kg por barril de carga (Agosto 2016), con un costo adicional de \$764,6 millones de pesos (Figura 24).

**Figura 24. Tendencia comportamiento del consumo fenol.**



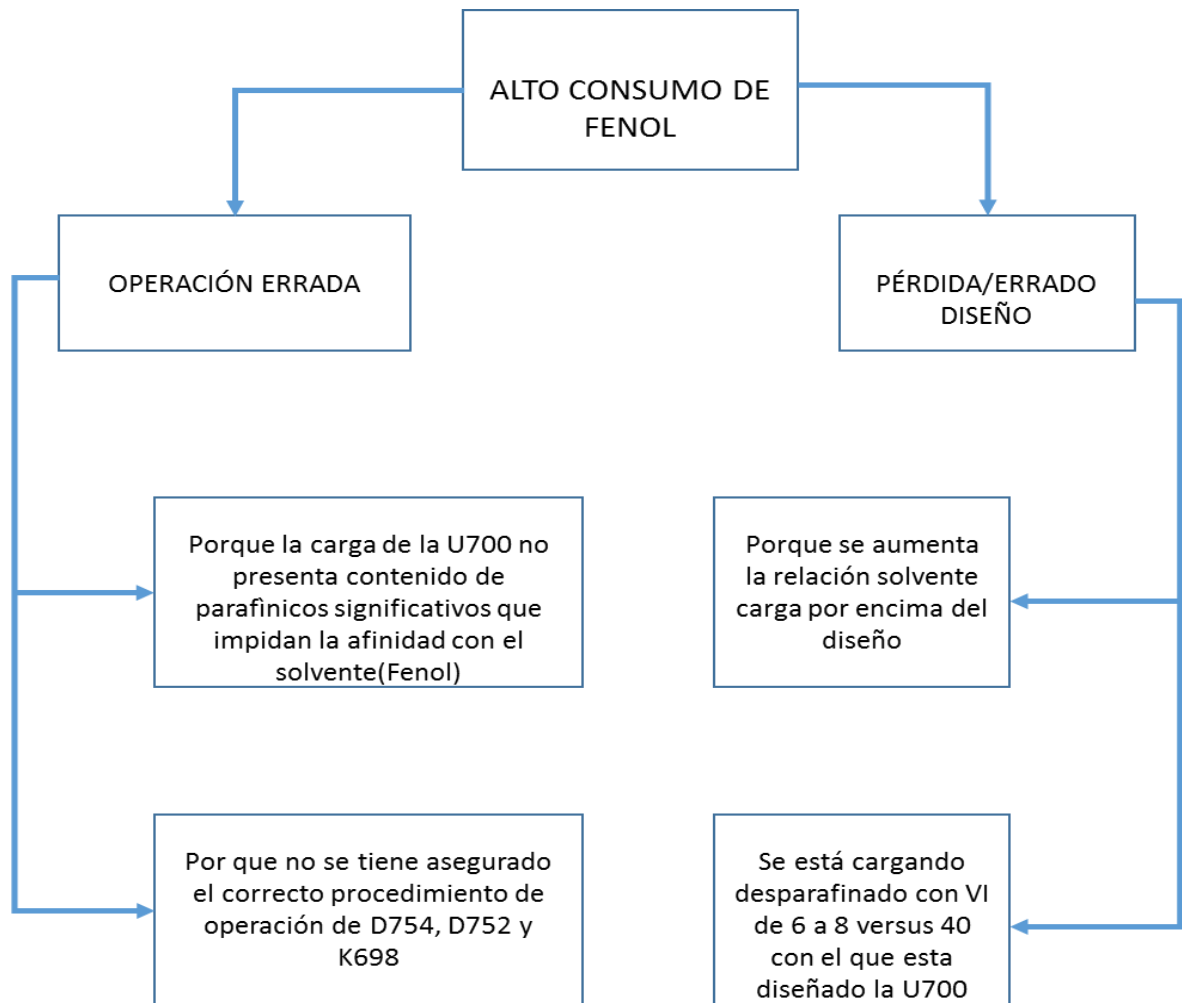
De acuerdo con lo descrito anteriormente, se procedió a revisar el análisis RCA realizado a esta unidad en el año 2015 (Tablas 10 y 11). En esa ocasión se encontraron dos causas básicas relacionadas con el alto consumo de fenol: a) presencia de errores procedimentales en la operación y b) modificación de los parámetros de operación con relación a los establecidos por diseño.

**Tabla 11. RCA consumo fenol en la Unidad de Extracción Líquido-Líquido.**

SISTEMA	EFECTO PRIMARIO	CAUSAS PROBABLES	DIMENSIONES DEL PROBLEMA				SE HA CONOCIDO COMO CAUZA RAIZ EN EL PASADO?	ESTA CAUSA REPETIRIA EL PROBLEMA?	ELIMINANDO LA CAUSA SE REPETIRIA EL PROBLEMA	CAUSA RAIZ	
			IDENTIDAD QUE?	TIEMPO CUANDO?	LUGAR DONDE?	EXTENSION CUANTO					
			PERDIDA DE FENOL	DE JULIO A DICIEMBRE DEL 2014	U700	\$1,3 MILLARDOS					
U-700	PERDIDA DE FENOL	desconocimiento de procedimiento realizado	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	
		se tiene criterios diferentes entre personal de operaciones(no existe un solo criterio dado que las herramientas de entrenamiento no son puntuales en este procedimiento	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
		por que no existe la información completa de la U700,(bases de diseño, filosofía de operación)	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
		Por que en los proceso de arrancada o parada de la U700 no se tiene disponible un operador en tablero exclusivo para esta actividad	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
		en todo proceso de arrancada o parada del U7000 se debe tener un tablerista en la planta o el COR	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
		por que la carga de la U700 no presenta contenidos de parafinicos significativos que impidan la afinidad con el solvente(fenol)	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI
		por que no hay un adecuado intercambio en E759 (fenol)y en E753(carga) ver numeral daño mecanico de equipo estatico	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
		Daño del empaque de intercambiador E757	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
		cambio de carga(no existe procedimiento) de liviano a medio o viserversa	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
		inyeccion de agua fenolica desde K698(no existe) mas operacion de D754	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
		inyeccion de agua a T753A(no existe)	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
		descontaminacion del fenol de D751 a travez de la T753B(no existe)	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
		cumplimiento de por parte del supervisor y lider de excelencia durante el pare, arranque y cambio de carga de la U700	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
		falta de medir la concentracion de fenol en agua fenolica(se requiere)concentracion de fenol en refinato)	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO
		por que no se tiene asegurado el correcto procedimiento de operacion de D754,D752 y K698	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI
		se esta cargando desparafinado con VI de 6-8 versus 40 con el que esta diseñado	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
por que se aumenta la relacion solvente carga por encima del diseño	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI		
daño de equipo estaticos.	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO		
Diseño de instrumentos	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO		

Fuente: ECOPETROL S.A.

**Figura 25. Resumen esquemático del RCA realizado en la Unidad de Extracción Líquido-Líquido.**



Fuente: ECOPELROL S.A.

A partir del RCA realizado se emitieron diferentes recomendaciones por el equipo de ingeniería, con objeto de solucionar las pérdidas de fenol y recuperar la confiabilidad operacional de la unidad. Éstas se agruparon en cuatro categorías nombradas como solución 1, solución 2, solución 3 y solución 4 (ver tabla 11):

**Tabla 12. Recomendaciones con relación al RCA realizado en la Unidad de Extracción Líquido-Líquido.**

Solución 1			Garantizar que la carga a la unidad de fenol tenga los contenidos significativos de los compuestos parafínicos.
Ítem	Realizado	Tareas	Entregable
1	SI	Realizar divulgación de las acciones del RCA	Acta de divulgación.
2		Programar con planeación el despojo de livianos en el desparafinado liviano que se encuentra en tanques utilizando el proceso de hidrotatamiento	Acta de planeación.
3	NO	Elaborar correlación de VI Vs contenido de aromáticos de la carga a la U700 para identificar posible presencia de solvente(Tolueno)	Realizar memorando a gerencia técnica para realizar solicitud.
4	NO	Incluir en el acuerdo de servicio con laboratorio o ICP para la medición del % de contenido de compuestos parafínicos(Saturados). Aromáticos(A), resinas(R), asfaltenos(A)en los aceites desparafinado (análisis SARA) livianos.	Realizar memorando a gerencia técnica para realizar solicitud.
5	NO	Realizar inclusión en el procedimiento de recibo de desparafinado que cuando con VI menor a 25 se debe enviar el desparafinado para alguna corriente diferente y asegurar que se incluya en las condiciones operacionales anticipadas.	Procedimiento operacional actualizado.
Solución 2			Cargar la unidad de fenol con aceite desparafinado con VI mayor que 25.
1	NO	Realizar inclusión en el procedimiento de recibo de desparafinado que cuando con VI menor a 25 se debe enviar el desparafinado para alguna corriente diferente y asegurar que se incluya en las condiciones operacionales anticipadas.	Procedimiento operacional actualizado.
2	NO	Incluir en los datos de laboratorio de CDLAB, los parámetros máximos de fenol en rafinato y extracto	Verificar en CDLAB, incluir en rafinato.
Solución 3			Asegurar el correcto procedimiento de operación del D752, D758 y D798
1	SI	Revisar el procedimiento que esta cargado en P( de D754, RFN-I-1049, ajustarlos si es necesario para que contengan como operar la SP759(Tiempo), tiempo de residencia de D754 en el cual se esta separando la interface, como identificar que ya esta separado la interface, como enviar al K698 el agua fenólica y como enviar el aceite a GAO.	Procedimiento operacional actualizado con la metodología de disciplina operativa.
2	SI	Elaborar procedimiento con D.O. (disciplina operativa) para eliminar livianos del D752(aceite).	Procedimiento operacional actualizado con la metodología de disciplina operativa.
3	SI	Incluir en la ronda del operador de patio fenol, la revisión de D754 y mantener vacío este drum.	Ronda operativa actualizada.
4	SI	Definir ventana operativa de K698 en máximo 90% y D753 máximo 40% .	Ventanas operativas definidas en RIS.
Solución 4			Establecer la mejor relación solvente / carga, de acuerdo al tipo de carga recibida.
1	NO	Ajustar en el plan de calidad los parámetros de calidad de destilados U150 las especificaciones de recibo de destilados (punto inicial 320 °C, 5% de recobrado en 345 °C) mínimo para destilado liviano.	Realizar memorando a crudos con copia a planeación a la producción.
2	NO	Ajustar parámetro de CDLAB para realizar control de cálida a los destilados	Realizar memorando a crudos con copia a planeación a la producción.
3	SI	Realizar investigación de posible arrastres de solvente MEK-TOLUENO por operación del recobro de desparafinado fuera del diseño.	Realizar intervención del E1246.
4	NO	Garantizar el cumplimiento del punto inicial del desparafinado en 300 °C mínimo	Realizar memorando a laboratorio para incluir este análisis.
5	NO	Realizar análisis de agua fenólica en K698 cuando se vaya a inyectar al D752, con frecuencia diaria	Realizar memorando a laboratorio para incluir este análisis.
6	NO	Revisar la opción de despojo del destilado directamente desde Topping.	Alternativas para el despojo de destilados en Topping.
7	SI	Intervenir los E756 y E757 en los que se encontró que el E757 presento pase entre los pasos se realizo ajuste con torque y se pudo solucionar	Equipos confiables para la operación.
8	SI	Realizar ajuste al fondo de la T755 por medio de muestras visuales tomadas por los operadores.	Ronda operativa.
9	NO	Realizar limpieza del E759.	Equipos confiables para la operación.
10	SI	Realizar recomendación técnica para abrir T753 B y realizar recuperación de válvulas y platos.	Recomendación técnica
11	NO	Ejecutar recomendación técnica para abrir T753 B y realizar recuperación de válvulas y platos.	Mantenimiento a T753B
12	NO	Realizar diagnostico de la secuencia de encendido y apagado de los H751 t H752 y entregar recomendación para la recuperar la secuencia de encendido-apagado de acuerdo a la necesidad de los hornos.	Recomendación técnica para optimizar la lógica de control del H751 y H752.
13	NO	Realizar compra de quemadores del H751	Compra de quemadores.

Fuente: ECOPEPETROL S.A.

Solución 1. Garantizar que la carga a la unidad de fenol tenga los contenidos significativos de compuestos parafínicos:

- a) Realizar el despojo de aceite desparafinado en la unidad de hidrotreatmento, como proceso adicional a la producción de bases, con el objetivo de eliminar los componentes más livianos que afectan la estabilidad operacional de dicha unidad de proceso cuando se carga este producto. Esto se debe realizar teniendo en cuenta los resultados del análisis de caracterización de los tanques de almacenamiento que cargan a la unidad de extracción líquido-líquido.
- b) Realizar análisis SARA en los laboratorios del ICP. Estos análisis a la fecha no han sido posible realizarlos por no estar incluidos en los acuerdos de servicio con el laboratorio industrial y el instituto Colombiano del Petróleo.

Solución 2. Cargar la unidad de fenol con aceite desparafinado con un VI > 25:

El procesamiento de desparafinado con VI menor a 25 se continúa realizando. Sin embargo, para solventar dicho inconveniente es posible agregar a este producto mejorador de VI.

Solución 3. Asegurar el correcto procedimiento de operación del D752, D754 y K698:

Con relación a esta recomendación es de aclarar que ya fue implementada de manera que la elaboración, comunicación y aplicación de procedimientos operativos se han cumplido.

Solución 4. Establecer la mejor relación solvente/carga de acuerdo al tipo de carga recibida:

- a) El plan de calidad para los destilados parafínicos ya está establecido; sin embargo, el cumplimiento de éste depende de la prioridad de la operación establecida por la GRB.
- b) Es necesario evaluar la posibilidad de arrastre de solvente de MEK con el aceite desparafinado. Este análisis ya fue realizado, centrándose en la eficiencia del calentador E-1246, equipo que da energía calórica a la corriente de aceite desparafinado para el despojo parcial del solvente en la torre T-1201B. Las acciones de esta investigación también fueron implementadas; sin embargo, no fueron efectivas debido a que continuó el arrastre de solvente con el aceite desparafinado.
- c) Es necesario realizar el mantenimiento a los intercambiadores de calor E-756, E-757 y E759: el intercambiador E-757 llegó a presentar pase de un fluido al otro. Esta recomendación ya ha sido implementada a la fecha.
- d) La inspección de la torre de extracto T-753 halló platos caídos y el plato colector sin empaques impidiendo un buen funcionamiento de ésta, por lo que ha sido necesario intervenirla mecánicamente.
- e) También ya ha sido recuperada la confiabilidad operacional de los hornos H-751 y H-752 de la unidad; sin embargo, queda pendiente el reemplazo de los quemadores del horno H-751.

Después de la implementación de las recomendaciones anteriormente mencionadas la operación de la unidad de extracción líquido-líquido con fenol mejoró su desempeño; sin embargo, continuó presentando inestabilidad y el consumo de solvente (fenol) siguió incrementándose por lo que, a principios de 2016, fue necesario realizar análisis adicionales, esta vez con relación a la eficiencia térmica de los intercambiadores de calor presentes en la sección de recuperación de fenol de dicha unidad (Figura 26).

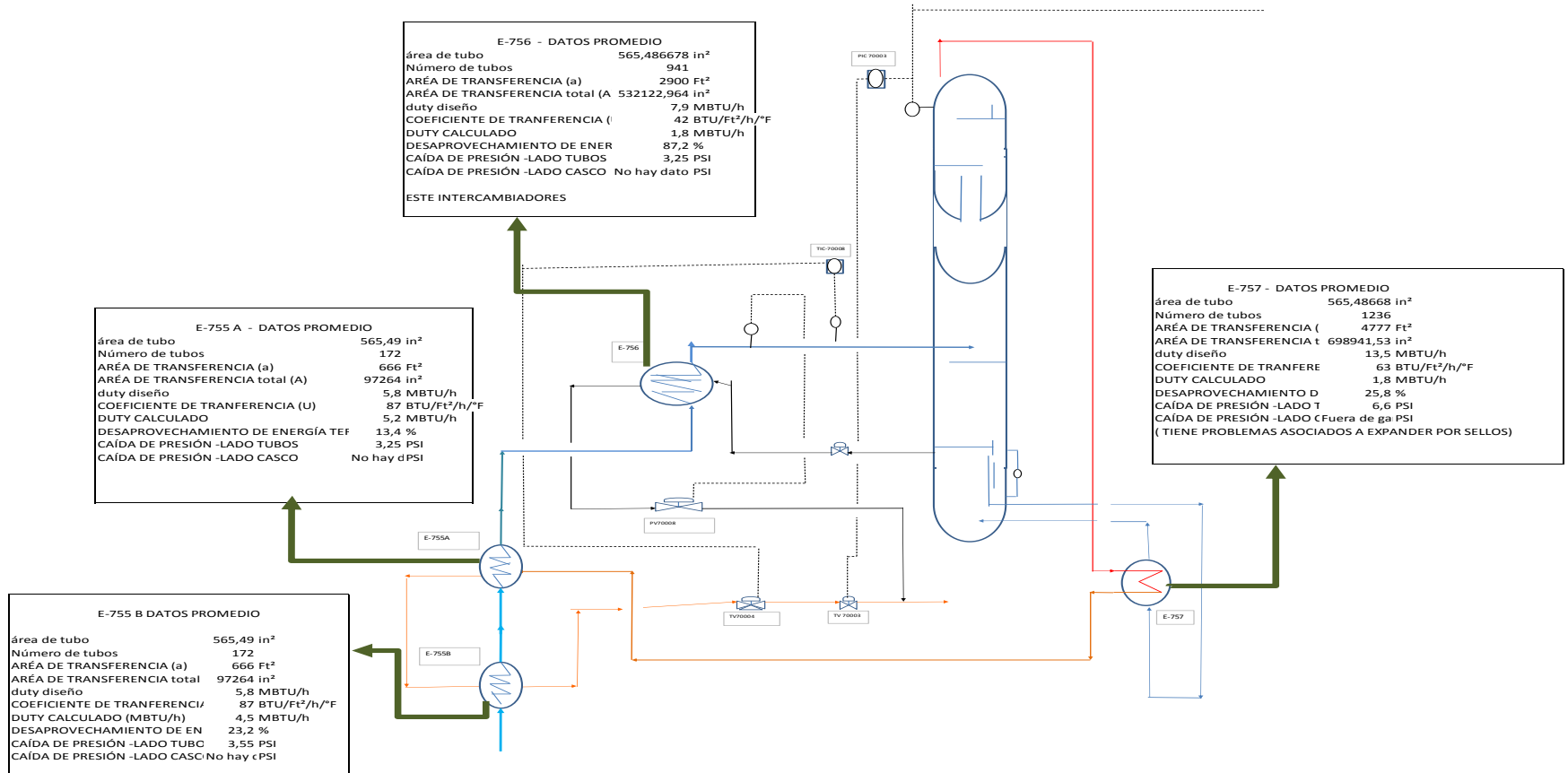
De dicho análisis se concluyó que el intercambiador E-757 continuaba presentando contaminación de fluidos y consecuentemente pérdida de fenol. Durante el mantenimiento respectivo se determinó que la falla del equipo se encontraba en los anillos de la tapa flotante del equipo, ya que se presentaban mayores a la del diseño de manera que, cuando el proceso se encontraba a temperatura de operación 450°F (232°C), no presentaban suficiente elongación para mantener sello entre el lado casco y lado tubos del intercambiador.

**4.2.4 Unidad de desparafinado con solvente MEK/tolueno** Como se ha comentado con anterioridad el desparafinado con solvente es un proceso de separación física que se da por enfriamiento del destilado de petróleo rico en compuestos parafínicos y en presencia de un solvente en una proporción de 50% volumen de MEK (hace precipitar las parafinas) y 50% en volumen de tolueno (mantiene en solución el aceite).

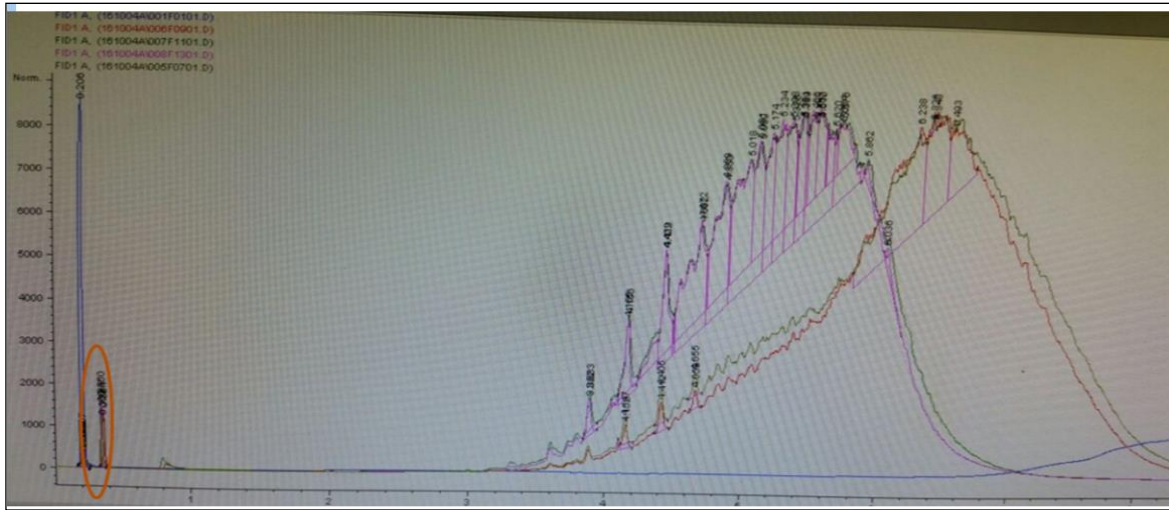
Se analizaron las condiciones de diseño y su condición operacional actual. Para ello se tuvo como premisa revisar las características físico-químicas del destilado y del aceite desparafinado utilizado como carga en la unidad de fenol, para lo cual se enviaron al laboratorio central de la GRB muestras de unidades K-647 (aceite desparafinado Medio), K-667/K-648 (aceite desparafinado Liviano), E-1216 (aceite desparafinado medio que sale de la unidad de desparafinado) y el destilado que se recibe de la U-150, todas ellas seleccionadas con el propósito de identificar sus componentes principales mediante análisis de cromatografía (Figura 27). El resultado de dichos análisis indicó la presencia de solvente (MEK-Tolueno) con la corriente de aceite desparafinado hacia la unidad de extracción líquido-líquido.

**Figura 26. Análisis de evaluación térmica de intercambiadores presentes en la sección recuperadora de fenol.**

RESUMEN DIAGNOSTICO INTERCAMBIADORES DE CALOR ASOCIADOS A LA TORRE DE RECUPERACION DE FENOL



**Figura 27. Cromatografía de los aceites desparafinados.**



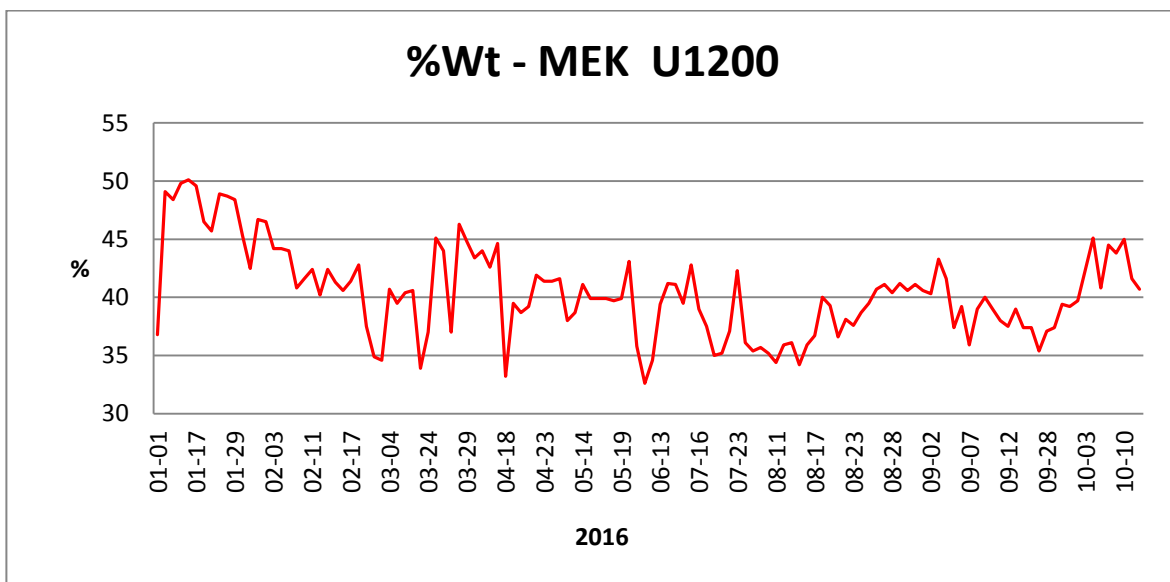
Fuente: Tomado de los análisis de laboratorio industrial de la GRB.

Al analizar la información de diseño con relación a la relativa operación actual del proceso de recobro de solvente en el aceite desparafinado se observa que la carga a esta sección a través de la torre flash atmosférica T-1201A es mayor de 480 BPH, encontrándose por encima de la de diseño (450 BPH). Lo mismo sucede para la carga posterior hacia la torre flash de baja presión T-1201B (400 BPH (actual) vs 250 BPH (diseño))



Por otro lado, en la Figura 29 se muestra la concentración en porcentaje en peso de MEK que ha tenido el solvente durante el año 2016 y el cual ha sido utilizado en la sección de recobro de aceite desparafinado. Se puede observar que para el mes de enero del año 2016 el porcentaje en peso de MEK en el solvente está muy cercano a los valores antes recomendados. Sin embargo, a partir de entonces el porcentaje de MEK en la sección se ha encontrado en torno a valores de 35-45%.

**Figura 29. Concentración porcentaje en peso de MEK en el solvente empleado en la sección de recobro de la Unidad de desparafinado.**



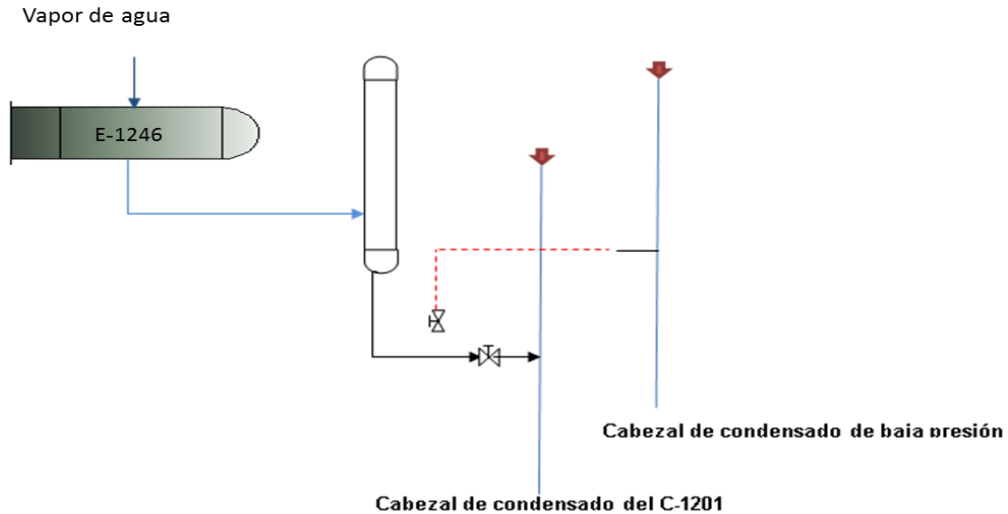
Con base en la información anterior se evaluó el desempeño de esta unidad a través de simulación empleando la herramienta PROII-Simsci Process Trademark. El propósito de esta evaluación fue encontrar a partir de la sensibilización de diferentes escenarios de relación MEK/Tolueno, las condiciones óptimas en las que se alcanza a eliminar el arrastre de solvente en el aceite desparafinado producto y determinar las oportunidades de mejora en las variables operacionales del recobro y sus limitaciones actuales con respecto al diseño de la unidad (ver Anexos A1, A2 y A3).

A partir de los resultados mostrados con anterioridad y la evaluación realizada mediante simulación se establecieron las siguientes acciones recomendadas o premisas que se deben cumplir, con el propósito de garantizar una operación confiable y segura en la sección de recobro de aceite desparafinado y evitar el arrastre de solvente hacia la Unidad de extracción con fenol (U700):

- a) La concentración en porcentaje en peso de MEK en la sección de recobro de aceite desparafinado debe estar entre 50% y 55% en peso (para el tolueno entre 50 y 45% en peso). Fuera de este intervalo de control se ocasionará desviaciones en la operación del recobro ya que no se logrará un adecuado equilibrio de separación de fases, afectando directamente la vaporización del solvente y, por ende, favoreciendo el arrastre de alguna de las sustancias que compone el solvente (preferentemente tolueno) en la corriente de aceite desparafinado producto (ver Anexo A4). Para el logro de este objetivo es importante el seguimiento y control de las concentraciones de solvente recomendadas.
  
- b) La carga a la unidad de recobro de aceite desparafinado se debe mantener en valores iguales o inferiores a la del diseño 60.KLBH (450 BPH) y a temperatura de operación de 470°F (243°C). Es de recordar que el aceite no se vaporiza a las condiciones de diseño y operación de la unidad; éste sólo se calienta, lo cual significa que parte de la energía en forma de calor sensible que se utiliza para calentarlo es posteriormente necesaria para vaporizar el solvente y, en el peor de los casos, ocasiona un déficit de energía térmica en forma de calor latente para vaporizar éste, lo que origina un arrastre hacia la corriente de producto. Para evitar lo anterior se debe garantizar que el flujo másico de aceite ingresando a la unidad de recobro no sea superior a 60.KLH (450 BPH), (el valor límite inferior de aceite será supeditado por el flujo mínimo de operación de la bomba de carga a la unidad (Ver Anexo A4).

- c) Actualmente, la relación de vapor de despojo-producto en la torre T-1202B se opera a una relación de 6 lb vapor de despojo/barril de producto. Es necesario ajustar el flujo de vapor de despojo a una relación de 7.5 a 10 lb (entre 1000 y 1400 LBH). Con relaciones superiores a 10 lb se incurre en el riesgo de arrastre de aceite en la cima de la torre, mientras que relaciones inferiores a 7.5, a problemas de arrastre de solvente con el desparafinado (Seminario de Refinación, UOP, Chicago, Illinois, 2008) (Ver Anexo A5).
- d) Reubicar la línea de condensado C-1201 del intercambiador de calor E-1246 (según Figura 30). Este intercambiador aporta calor latente a la corriente de entrada de aceite desparafinado y solvente a la T-1201B y está diseñado para aumentar la temperatura de la corriente de salida en 5°F máximo, siempre y cuando existan la concentración adecuada en peso de MEK/Tolueno en la unidad (ver numeral a). Actualmente, el condensado que se produce en el tambor acumulador de este intercambiador no puede ser desalojado debido a que está alineado a un cabezal de mayor presión (50psig) impidiendo con esto el retiro de condensado y limitando a su vez la operación del equipo. Se recomienda alinear este condensador hacia el cabezal que va hacia el drum D-1283 que se encuentra a 0 psig.

**Figura 30. Alineación del condensado recomendado para el E-1246.**



Fuente: ECOPETROL S.A.

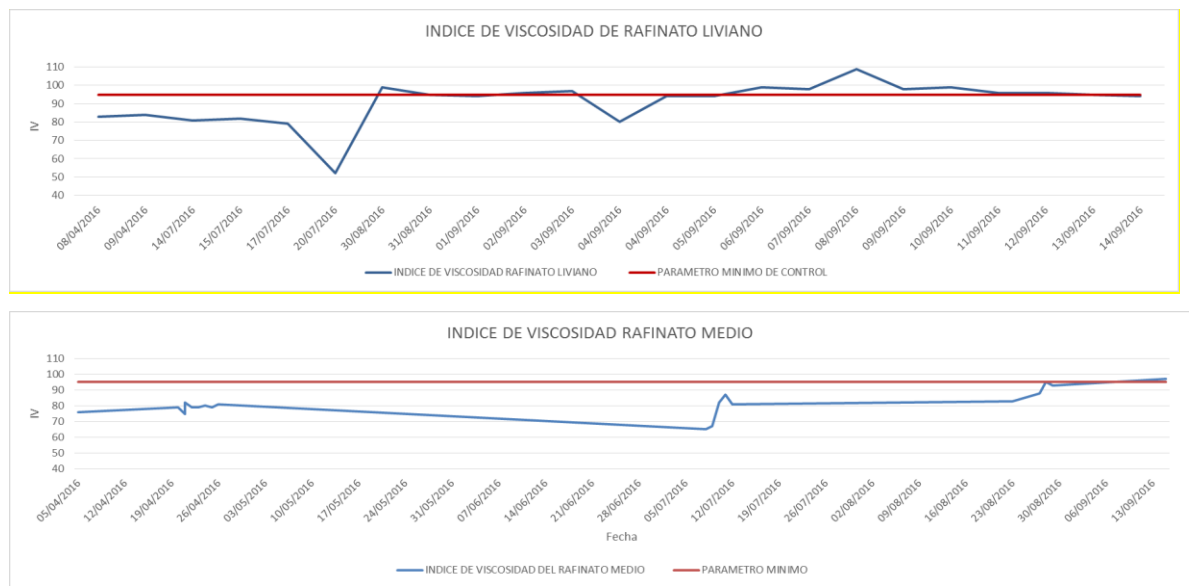
e) Por último, se recomienda operar las torres T-1201B y T-1202C a presiones menores que 15 psig (actualmente 30 psig) y 42 psig (actualmente 70 psig) respectivamente, con el fin de incrementar la eficiencia en el despojo de solvente.

Después de realizar todo el análisis de la producción de bases lubricantes, y ejecutadas las recomendaciones producto de este ejercicio, como los de operar la sección de recobro desparafinado a temperaturas de 475°F y ajustar el vapor despojador a la torre despojadora T1202B de 700 LbH a 1100 LbH, se ha logrado estabilidad operacional en el recobro de solvente de aceite desparafinado y los consumos de MEK se han ajustado al factor de diseño (0,26 Kg de MEK por barril de carga). Por otro lado, la concentración del MEK en la solución de solvente ha estado en valores mayores de 51% y el punto inicial de ebullición de acuerdo con los análisis de laboratorio en promedio de 330°C. La recuperación de solvente ha sido más eficiente con el decremento de las presiones de operación de las torres del recobro de desparafinado, y con esto se asegura que el aceite desparafinado

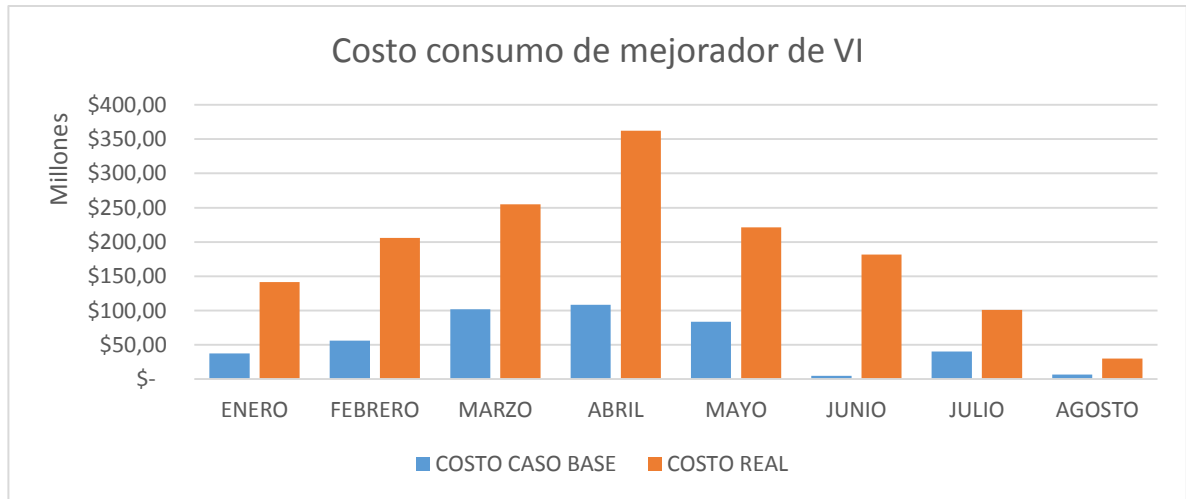
como carga a la unidad de fenol no presente solvente, eliminando este componente como factor desestabilizador de la operación de la U-700.

Por otra parte sumado a lo anterior, la recuperación mecánica de torre recuperadora de fenol (T753A) y su intercambiador de calor asociado el E757 y los ajustes operacionales resultados de los RCA realizado a esta unidad, han permitido incrementar el VI de la base lubricante hasta valores de 95, con esto se reduce el consumo de aditivo mejorador de VI el cual se estima un costo para el año 2017 de \$800.000.000 contra \$1.800.000.000 que se costó incrementar el VI a 95 en el año 2016.

**Figura 31. Índice de viscosidad (VI) de los refinatos (abril-Mayo del 2016).**



**Figura 32. Costo consumo de aditivo mejorador de índice de viscosidad (VI).**



### **4.3 DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE LUBRICANTES**

**4.3.1 Síntesis y caracterización de los lubricantes** Se realizó un análisis especializado de las bases lubricantes producidas dentro del Departamento de Parafinas y Fenol. Este análisis se llevó a cabo en el Laboratorio Industrial de la Refinería de Barrancabermeja de ECOPETROL S.A. Posteriormente, las muestras de bases lubricantes fueron enviadas a una casa matriz para formulación de los lubricantes; para este caso se envió muestras a la empresa BRB BV de Holanda que formuló el lubricante con su paquete de aditivos Petrolad 9530. Los resultados obtenidos superaron las propiedades mínimas esperadas para el standard API (específicamente el ISO 68). Con la formulación recomendada por el fabricante (0.6% en volumen del paquete de aditivo), se realizó la síntesis de los lubricantes a escala de laboratorio en la GRB para, a continuación, llevar a cabo la caracterización de los mismos, en la cual se determinó los siguientes parámetros: viscosidad cinemática (a 40 y 100 °C), índice de viscosidad, punto de fluidez e inflamación, capacidad antiespumante,

número TAN, contenido en agua y corrosión a lámina de cobre. La caracterización se realizó tomando como base la normativa ASTM para cada uno de los ensayos.

Posteriormente, en mayo de 2016 se repitió el proceso de formulación de los lubricantes, esta vez incluyendo el ISO 32, caracterizando las bases y los lubricantes que fueron analizados en el laboratorio de la GRB bajo las siguientes identificaciones:

- ID 204357728: Base Parafínica Liviana
- ID 204357731: Base Parafínica Liviana aditivada con PETROLAB 9530 (0.6%v/v).
- ID 204357739 Base Parafínica Madia
- ID 204357741 Base Parafínica Madia aditivada con PETROLAB 9530 (0.6%v/v).

Los resultados de estos análisis se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 13. Resultado de la síntesis de Lubricante ISO 32 e ISO 68.**

RESULTADO DEL ANALISIS DE LA SINTESIS DE LUBRICANTE ISO 32 E ISO 68										
CODIGO DE LA MUESTRA	NOMBRE	CORROSION LAMINA DE COBRE (3H/100 °c)	PUNTO DE FLUIDEZ [°C]	AZUFRE [g/100g]	AZUFRE EN PPM [mg/kg]	VISCOSIDAD CINEMATICA A A 100 °c [mm2/s]	VISCOSIDAD CINEMATICA A 40 °c [mm2/s]	INDICE DE VISCOSIDAD	GRAVEDAD API	DENSIDAD A 60 °f [Kg/m3]
ID 204357728	BASE PARAFINICA LIVIANA	1A	0	0	236	4,977	28,4	99	31,7	866,4
ID 204357731	BASE PARAFINICA LIVIANA aditivada con PETROLAB 9530 al 0.6%	1A	0	0,1	1091	4,977	28,49	98	31,5	867,4
ID 204357739	BASE PARAFINICA MEDIA	1A	0	0,1	537	8	61,32	95	29,55	877,7
ID 204357741	BASE PARAFINICA MEDIA aditivada con PETROLAB 9530 al 0.6%	1A	0	0,1	1350	8	61,19	95	29,4	878,6

Se puede observar que las base parafínica liviana y media con el paquete de aditivo Petrolad 9030 al 0.6% v/v cumplen con las especificaciones de los

lubricantes ISO 32 e ISO 68. Los resultados de los análisis realizados por el laboratorio CYAT se muestran en el Anexo A9.

Adicionalmente, se consultó con la empresa Lubrizol experta en formulación de lubricantes a la que se envió la caracterización de las bases producidas en Ecopetrol y formularon los lubricantes industriales ISO 32 e ISO 68, con paquete de aditivo LZ 5810 en 0,7% peso y depresor de fluidez LZ7749B al 0,1% en peso.

**4.3.2 Generación Y Análisis De Alternativas De Diseño De Una Planta De Producción De Lubricantes.** Durante la generación de alternativas de diseño de la planta de producción de los lubricantes ISO 32 e ISO 68, se identificaron las necesidades, recursos y equipos necesarios, para dicho diseño. Así mismo, se procedió a inventariar los equipos y recursos disponibles dentro en el Departamento de Parafinas y Fenol, que pudieran ser empleados durante el diseño de la planta y que permitan descartar o, por el contrario, potenciar la viabilidad de ciertas alternativas con respecto a otras. En este sentido, se tuvo en cuenta además la posibilidad de adecuación de ciertos sistemas o unidades para este propósito. Dentro de esta etapa se llevó a cabo el estudio de factibilidad técnico-económica de cada una de las alternativas de diseño generadas durante la etapa anterior, de acuerdo a las necesidades de la GRB, y recursos y equipos disponibles en el Departamento.

En este sentido, para el diseño conceptual de la planta de lubricantes se plantearon dos alternativas:

- a) Con los equipos que se tengan disponibles, construir una planta de lubricantes.
- b) Aprovechar los equipos disponibles para el diseño de la planta de lubricantes teniendo en cuenta que están instalados en una misma área y que

se tiene la infraestructura para disponible para arrancar el proceso con adecuaciones de líneas de proceso.

Debido a la crisis económica que actualmente experimenta la industria petrolera por la caída del precio del barril de petróleo, las empresas de este sector se encuentran ejecutando planes de austeridad que implican la reducción de costos de producción e inversiones en nuevos proyectos. En este sentido, ECOPETROL no es ajena a estas circunstancias, por lo que construir una planta de lubricantes no es viable en la coyuntura actual, por lo que la alternativa a) no es viable en términos económicos. Es así que la alternativa b) se presenta finalmente como única alternativa para el desarrollo de este proyecto y es altamente favorable, ya que sólo se requiere de adecuaciones de tubería y adquisición de equipos de bajo costo.

**4.3.3 Identificación de necesidades, recursos y equipos necesarios para el diseño conceptual de la planta de lubricantes.** La planta de lubricantes será diseñada para la producción de lubricantes industriales ISO 32 e ISO 68 y tendrá una capacidad de producción de 8400 galones mensuales (4200 de lubricante de ISO 32 y 4200 de lubricante ISO 68). Esta capacidad de producción podrá ser incrementada y diversificada de acuerdo con la demanda de lubricantes.

La planta de lubricantes estará ubicada dentro del Departamento de Parafinas y Fenol con el fin de reducir costos de transporte, construcción de adecuaciones y aprovechamiento de equipos en desuso y disponibilidad de servicios industriales, facilidades de distribución y mano de obra calificada. La materia prima será suministrada por el proceso de producción de bases lubricantes y serán almacenadas en recipientes o tanque con capacidad mínima de almacenamiento de 4200 galones cada uno. Una vez almacenada la materia prima para la producción de los lubricantes, se caracterizarán para determinar

especialmente si sus propiedades básicas como viscosidad (40 y 100°C), índice de viscosidad, punto de fluidez, corrosión y contenido de azufre se encuentran en especificaciones. Posteriormente, asegurada la calidad de la materia prima, se adicionará el paquete de aditivos, se homogenizará el producto y se caracterizará el lubricante para su distribución. En este sentido los equipos que se requerirán son:

- Una bomba para transportar la base lubricante hasta el tanque de almacenamiento de la materia prima.
- Tuberías y sus accesorios como codos y válvulas de compuerta.
- Dos tanques de almacenamiento de capacidad de 4200 galones para almacenar las bases y preparación del lubricante construidos bajo normas API. Estos tanques deben tener un sistema de calentamiento que eleve la temperatura de la base y el aditivo con el fin de disminuir la viscosidad del producto para así obtener una mezcla homogénea del lubricante. Cada tanque deberá tener medición de nivel y agitadores o en su defecto se deberá adecuar una bomba con recirculación a los tanques de lubricantes.
- Un tanque y una bomba para el almacenamiento e inyección del aditivo.
- Bomba de recirculación que succione la base y el aditivo que se necesite según el tipo de lubricante que se vaya a producir, desde el tanque respectivo y recircularlo al mismo tanque. También será bomba de despacho.
- Intercambiador de calor que permita el calentamiento para bajar la viscosidad de la mezcla.
- Una llenadora automática de tambores de 55 galones.
- Un montacargas para la movilización y despacho de los lubricantes.
- Servicios industriales: electricidad, aire industrial y agua industrial.

**4.3.4 Inventario de equipos y recursos disponibles dentro en el Departamento de Parafinas y Fenol para la construcción de la Planta de Producción de Lubricantes.** Las unidades de proceso del Departamento de Parafinas y Fenol fueron construidas en el año 1967 con el fin de producir bases lubricantes y parafina para abastecer el mercado nacional. La mayoría de los equipos y recursos requeridos para la planta de lubricantes están disponibles en el Departamento de Parafinas y Fenol, por lo que la inversión en estos equipos sería baja. Los equipos disponibles son:

- Tres tanques de almacenamiento (identificados como K-1289, K-1290 y K-1291, ver Figura 29), con capacidad de 12684 galones cada uno. Estos recipientes están contruidos bajo la norma API 806 y cuenta con un sistema de calentamiento por medio de resistencias eléctricas diseñadas para mantener el fluido contenido del tanque en 82°C. Este sistema de calentamiento se puede graduar para controlar la temperatura entre 50 y 60°C que es la temperatura ideal para realizar la mezcla de la base con los aditivos. Posee medición de nivel tipo radar (telemetría) con señal al sistema de control distribuido, al que se realizó mantenimiento en mayo del año 2016 y se encuentra en condiciones de operación. La condición de estos equipos es la siguiente:

→ Tanque K-1289: Este tanque presenta temperatura por debajo del requerido (35°C vs 50°C), la corriente consumida es 16 A vs 18 A (posiblemente esté abierto el circuito). Se debe realizar mantenimiento en la caja de conexiones de resistencia PAD#2 ya que registra muy poco consumo de corriente (3 A vs 5 A) y el conjunto cable-motor presenta muy bajo de aislamiento (0,01 Mohs). Si se requiere, se debe trasladar el motor al taller eléctrico para mejorar la condición y realizar mantenimiento general (cambio de cojinetes, pruebas eléctricas).

**Figura 33. Tanques de almacenamiento K-1289, K-1290 y K-1291 del Departamento de Parafinas y Fenol.**

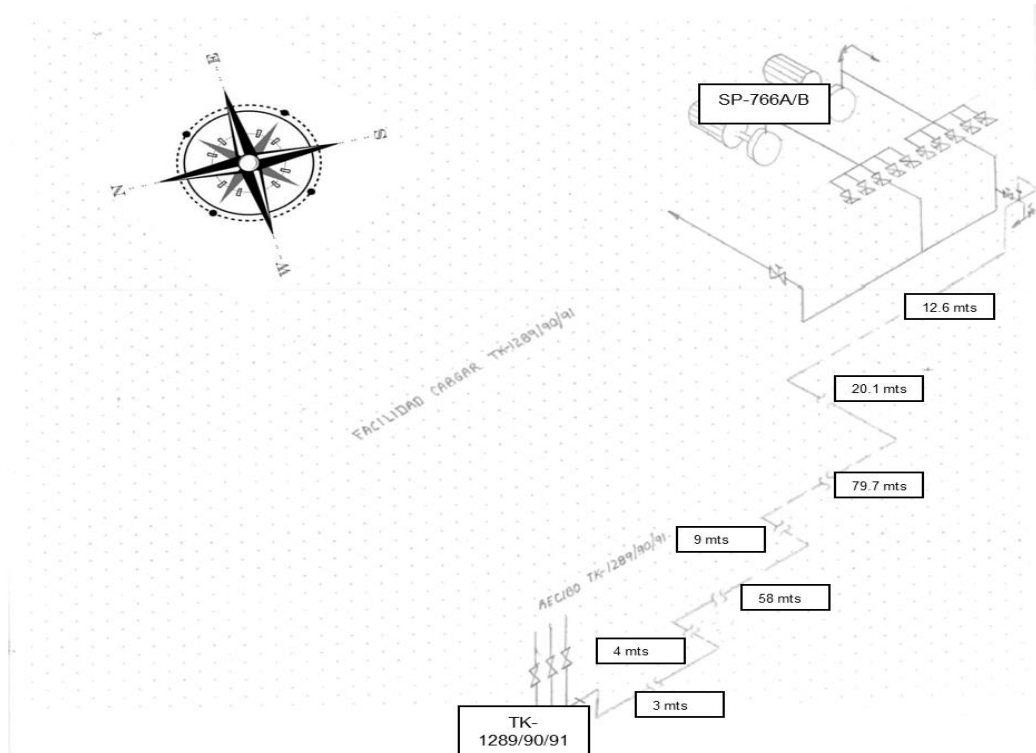


- Tanque K-1290: Este tanque presenta temperatura por debajo del requerido ( $35^{\circ}\text{C}$  vs  $50^{\circ}\text{C}$ ). La corriente consumida es 13,7 A vs 18 A (posiblemente esté abierto el circuito). Se debe realizar mantenimiento en la caja de conexiones de resistencia PAD#5 ya que presenta gran cantidad de agua y no registra consumo de corriente (0 Amperios). Se debe rotar el motor para preservar los equipos rotativo y eléctrico.
- Tanque K-1291: Este tanque opera de forma correcta. Sin embargo, es necesario realizar una ronda de rotación de equipos para evitar que ingrese humedad al aislamiento del motor, así como evitar daños en los cojinetes del motor y agitador por permanecer sin movimiento.

- Bomba para enviar las bases lubricantes hacia los tanques K-1289 y K-1290. Existen dos alternativas para enviar la materia prima para los lubricantes a los tanques de mezcla mediante las bombas de producto directamente del proceso a una velocidad de flujo de 2520 galones por hora y/o a través de la bomba de trasiego de tanques intermedios P-766, a una velocidad de 2100 galones por hora; ambas alternativas son viables y no generan trastorno al sistema.
- Bombas para circulación y despacho de lubricantes: se cuenta con dos bombas denominadas P-1273A y P-1273B con capacidad de 3000 galones por hora, que tienen instaladas facilidades para succión y circulación del producto a los tanques anteriormente mencionados. Tanto tanques de almacenamiento como las bombas P1273 se encuentran ubicados en una misma área de aproximadamente 400 metros cuadrados.
- El Departamento de Parafinas y Fenol cuenta con un montacargas adquirido en el año 2015 con el que se utilizaría para el cargue y transporte de los tambores de los lubricantes envasados.
- Los servicios industriales requeridos para el funcionamiento de la planta de lubricantes están disponibles: energía eléctrica de baja tensión (110V), energía eléctrica de media tensión (220V), aire industrial, agua industrial y aire para instrumentos electrónicos.

**4.3.5 Requerimientos adicionales** A partir de la identificación de los equipos que se requieren para la planta de producción de lubricantes e inventariados los equipos disponibles, se determina que es necesaria la construcción de una tubería para el transporte de la materia prima desde las bombas P-766 hasta los tanques de almacenamiento de aproximadamente 186,4 metros. Dicha tubería debe ser de 2 pulgadas y construida en acero al carbón (ver Figura 34). El costo de construcción de dicha tubería es de aproximadamente \$186.000.000.

**Figura 34. Trazado de tubería de 2" en acero al carbón para el transporte de materia prima hasta los tanques de almacenamiento para la preparación de los lubricantes.**



**4.3.6 Análisis Técnico. Cálculo hidráulico de la tubería requerida** A continuación se presenta el cálculo hidráulico para la tubería requerida para el transporte de 2100 galones/hora de bases lubricantes desde las bombas P-766 hasta los tanques de almacenamiento K-1289/K-1290/K-1291.

- Datos:**
- $V_{40^{\circ}\text{C}} = 67 \text{ mm}^2/\text{s}$
  - $V_{100^{\circ}\text{C}} = 8 \text{ mm}^2/\text{s}$
  - $\mu = 0.5684 \text{ Cp}$
  - $\rho = 867,4 \text{ Kg/m}^3 = 54.1 \text{ lb/ft}^3$
  - API = 29.55
  - $L = 184.6 \text{ m} = 605.64 \text{ ft}$
  - $D = 2 \text{ in}$

$$\Delta Z = 1\text{m}$$

**Accesorios:** 12 codos de 90° de 2 in  
1 Válvula de compuerta de 2 in

**Desarrollo:**

$$S = \frac{\rho_{\text{base}}}{\rho_{\text{H2O}}} = \frac{54,1 \text{ Lb/ft}^3}{64,4 \text{ Lb/ft}^3} = 0.84$$

Flujo a través de la línea que transportara la base para la preparación de los lubricantes.

$$Q = 50 \text{ bph} = 2100 \text{ gal} = 7948,5 \text{ lph}$$

$$\mu = 0,5654 \text{ Cp}$$

$$\mu = 0.5654 * 10^{-2} \text{ g/cm.s} * \left[ \frac{1 \text{ Lb}}{456.59 \text{ g}} \right] * \left[ \frac{30.48 \text{ cm}}{1 \text{ ft}} \right] = 3.77 * 10^{-3} \text{ Lb/ft.s}$$

$$D = 2 \text{ in} * \left[ \frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right] = \frac{1}{6} \text{ ft}$$

Cálculo del número de Reynolds, Re:

$$Re = \frac{\langle v \rangle * D * \rho}{\mu} \quad \text{Donde} \quad \langle v \rangle = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi * D^2}$$

$$Q = 50 \text{ b/h} * \frac{42 \text{ gal}}{1 \text{ b}} * \frac{3,785 \text{ l}}{1 \text{ gal}} * \frac{1000 \text{ cm}^3}{1 \text{ l}} * \frac{1 \text{ f}^3}{(30.48)^3 \text{ cm}^3} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}$$

$$Q = 0.078 \text{ ft}^3/\text{s}$$

$$\langle v \rangle = \frac{4 * 0.078 \text{ ft}^3/\text{s}}{\pi * \left(\frac{1}{6}\right)^2 \text{ ft}^2}$$

$$\langle v \rangle = 3.575 \frac{\text{ft}}{\text{s}}$$

$$\text{Re} = \frac{\langle v \rangle * D * \rho}{\mu} = \frac{3.575 \frac{\text{ft}}{\text{s}} * \frac{1}{6} \text{ ft} * 54.1 \frac{\text{Lb}}{\text{ft}^3}}{3.77 * 10^{-3} \frac{\text{Lb}}{\text{ft} \cdot \text{s}}}$$

$$\text{Re} = 663$$

Como el número de Re es menor que 2000 se considera que es un flujo laminar.

Se determina el factor de rugosidad de la tubería ( $\epsilon$ ), para este caso acero comercial (CRANE Co.):

$$\epsilon = 0.002 \text{ in}$$

Rugosidad relativa

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.002 \text{ in}}{2 \text{ in}} = 0.0005$$

Ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{\langle v_1 \rangle^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{\langle v_2 \rangle^2}{2g} + Z_2 + h_l$$

$$\Delta p = [h_l + \Delta Z] * \frac{S_i}{2.31}$$

Donde:

$$hl = \left[ f \frac{L}{D} * \frac{\langle v \rangle^2}{2g} + 1K_{\text{valvula compuerta}} * \frac{\langle v \rangle^2}{2g} + 12K_{\text{codos } 90^\circ} * \frac{\langle v \rangle^2}{2g} \right]$$
$$hl = \left[ f \frac{L}{D} + 1K_{\text{valvula compuerta}} + 12K_{\text{codos } 90^\circ} \right] * \frac{\langle v \rangle^2}{2g}$$

Coeficientes de resistencia para los accesorios:

$$K_{\text{valvula compuerta}} = 8fT$$

$$K_{\text{codo de } 90^\circ} = 30fT$$

$$f_T = 0.019$$

Entonces:

$$hl = \left[ 0.036 \frac{605.64 \text{ ft}}{\frac{1}{6} \text{ ft}} + 1 * 8 * 0.019 + 12 * 30 * 0.019 \right] * \frac{3.375^2 \text{ ft}^2/\text{s}}{2 * 32.2 \text{ ft}/\text{s}}$$

$$hl = 54.67 \text{ ft}$$

$$\Delta Z = -1 \text{ m} = -3.28 \text{ ft}$$

$$\Delta p = [54.67 \text{ ft} - 3.28 \text{ ft}] * \frac{0.84}{2.31}$$

$\Delta p = 19.67 \text{ psi}$  Caída de la presión de la línea propuesta.

Teniendo en cuenta los cálculos anteriores, que la bomba de trasiego opera a 80 psi, y que la presión de entrada al tanque de almacenamiento de las bases lubricantes está a presión atmosférica, en consecuencia las bombas P-766

tienen la capacidad requerida para desplazar 2100 galones/hora de bases lubricantes por la línea de 2 in propuesta para construcción.

Por otro lado, para la inyección del paquete de aditivo se requiere la compra de una bomba dosificadora (costo \$9.000.000), cuyas características deben permitir ajustar el volumen a inyectar (ver Anexo A11).

**4.3.7 Análisis económico. Selección del aditivo** Para el análisis económico, que permite tomar decisiones con respecto a la viabilidad financiera de este proyecto, se tomó como base el precio de venta de la base lubricante, y se evaluaron dos alternativas (ver Tabla 10):

- a) Alternativa número 1: Elaboración de lubricantes ISO32 e ISO 68 con paquete de aditivo y depresor de fluidez suministrado por la empresa Petroland.
- b) Alternativa número 2: Elaboración de lubricantes ISO32 e ISO 68 con paquete de aditivo y depresor de fluidez suministrado por la empresa Lubrizol.

**Tabla 14. Cotización paquete de aditivos para la producción de lubricantes ISO 32 e ISO 68**

COTIZACION PAQUETE DE ADITIVO PETROLAND 9533					
PAQUETE DE ADITIVO	UNIDAD	costo[ US\$]	costo [\$]	presentacion[Kg] Tambores	costo del tambor
PETROLAD 9533	Kg	14,6	\$ 43.800,00	200	\$ 8.760.000,00
depresor de fluidez	Kg	14,6	\$ 43.800,00	15,5	\$ 678.900,00

COTIZACION PAQUETE DE ADITIVO LUBRIZOL 5810					
PAQUETE DE ADITIVO	UNIDAD	costo[ US\$]	costo [\$]	presentacion[Kg] Tambores	costo del tambor
LUBRIZOL 5810	Kg	11,8784	\$ 35.041,28	195	\$ 6.833.049,60
LUBRIZOL 7749(DEPRESOR DE FLUIDEZ)	Kg	11,078	\$ 32.680,10	180	\$ 5.882.418,00

**Fuente:** Compañías Petroland y Lubrizol Ltda.

**4.3.8 Cálculos para estimar el costo de la inyección de aditivo:** Las dosis recomendada para la inyección de paquete de aditivo es de 0,06% en peso, como el paquete de aditivo no contiene depresor de fluidez, este se adquiere aparte, los costos de estos insumos se presentan en la tabla 10.

Densidad del paquete de aditivo dado por el fabricante:

$$\rho_{aditivo} = 0.998 \frac{Kg}{l}$$

Densidad de la base lubricante:

$$\rho_{base} = 864.7 \frac{Kg}{m^3}$$

Se calcula la masa de la base lubricante tomada de resultado de laboratorio GRB:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

$$m = \rho * v$$

$$m_{base} = 864.7 \frac{Kg}{m^3} * 1gal * \frac{3.785 l}{1 gal} * \frac{m^3}{1000 l}$$

$$m_{base} = 3.272 Kg$$

Un galón de base tiene 3.272 Kg.

Se calcula la masa del paquete de aditivo:

$$m_{aditivo} = \left[ 0.998 \frac{Kg}{l} * \frac{1000 l}{1 m^3} \right] * \left[ 1 gal * \frac{3.785 l}{1 gal} * \frac{1 m^3}{1000 l} \right]$$

$$m_{aditivo} = 3.77 Kg$$

Un galón de aditivo tiene 3.77 Kg.

De acuerdo con la formulación recomendada por la casa matriz que suministró el aditivo, la proporción que se debe agregar a la base es de 0,06% en peso, por tanto:

$$Inyección de aditivo = 3.272 Kg_{base} * 0,6\%_{aditivo}$$

$$Inyección de aditivo = 0.0196 Kg$$

Es decir, por cada 3.272 Kg de base se deben adicionar 0.0196 Kg de aditivo. Entonces para preparar un lote de 200 barriles (4200 gal) de lubricante se requiere:

$$Inyección de aditivo = 200 * 42 * 3.272 Kg * 0,6\% = 164.9Kg$$

Para preparar 200 barriles de lubricante se requiere 164,9 Kg de aditivo equivalentes en galones a :

$$v = \frac{m}{\rho}$$

$$v = \frac{164.9 Kg}{998 \frac{Kg}{m^3}} = 0.165 m^3$$

$$v = 0.165 \text{ m}^3 \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} = 43,6 \text{ gal}$$

164 Kg de aditivo equivalen a 43,6 galones

Como el lubricante requiere además un depresor de fluidez, entonces:

$$\text{Inyección de depresor de fluidez} = 200 * 42 * 3.272 \text{ Kg} * 0.1\% = 27.48 \text{ Kg}$$

Para 200 barriles de lubricantes se requieren inyectar 27,48 Kg de depresor de fluidez.

$$v = \frac{m}{\rho}$$

$$v = \frac{27.48 \text{ Kg}}{998 \text{ Kg/m}^3} = 0.27 \text{ m}^3$$

$$v = 0.027 \text{ m}^3 \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} = 7.13 \text{ gal}$$

$$\text{Total Inyeccion de aditivo}_{\text{Kg}} = 164.9 + 27.48 \text{ kg} = 192.38 \text{ Kg}$$

$$\text{Total Inyeccion de aditivo}_{\text{gal}} = 46,3 \text{ gal} + 7,13 \text{ gal} = 53,43 \text{ gal}$$

Se requieren 192.9 Kg de aditivo para preparar 27492 Kg de lubricante (1,27 barriles de aditivo por 200 barriles de base).

Como la formulación suministrada por LUBRIZOL requiere 0,7% en peso de aditivo y 0.1% en peso de depresor de fluidez y que las densidades del producto 998Kg/m<sup>3</sup>

$$\text{Inyección de aditivo} = 200 * 42 * 3.272 \text{ Kg}_{\text{base}} * 0,7\%_{\text{aditivo}} = 192.39 \text{ Kg}$$

$$\text{Inyección de depresor de fluidez} = 200 * 42 * 3.272 \text{ Kg}_{\text{base}} * 0,1\%_{\text{aditivo}}$$

$$\text{Inyección de depresor de fluidez} = 27,48 \text{ Kg}$$

Total inyección de insuma al lubricante suministrado por Lubrizol:

$$\text{Total Inyeccion de aditivo}_{\text{Kg}} = 192.39 + 27.48 \text{ kg} = 219.9\text{Kg}$$

En volumen:

$$v = \frac{192,39 \text{ Kg}}{998 \text{ Kg}/\text{m}^3} * \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} = 58 \text{ gal}$$

$$v = \frac{27,48 \text{ Kg}}{998 \text{ Kg}/\text{m}^3} * \frac{1000 \text{ l}}{1 \text{ m}^3} * \frac{1 \text{ gal}}{3.785 \text{ l}} = 7,13 \text{ gal}$$

$$\text{Total Inyeccion de aditivo}_{\text{gal}} = 58 \text{ gal} + 7,13 \text{ gal} = 65.13 \text{ gal}$$

Se requieren adicionar 192.39 Kg de aditivo LUBRIZOL 27,48 Kg de depresor de fluidez para preparar 27492 Kg de base (65,13 galones de aditivo más 7,13 galones de depresor de fluidez)

**Tabla 15. Bases de cálculo alternativa número 1 y alternativa número 2.**

<b>BASE CALCULO DE COSTO ALTERNATI VA 1</b>			
<b><i>Materia Prima</i></b>	<b>Cantidad requerida,</b>	<b>Precios, USD\$/unidad</b>	<b>Precios, USD\$/año</b>
Bases Paráfinica M, BPD	6,7	\$ 80,00	\$ 186.133,33
Aditivo Petrolad, kg	11,0	\$ 14,60	\$ 56.032,42
Depresor de Fluidez, kg	1,8	\$ 14,60	\$ 9.338,17
Bases Paráfinica L, BPD	6,7	\$ 80,00	\$ 186.133,33
<b>Total MP</b>	13,3	\$ 54,05	\$ 437.637,25
<b><i>Productos</i></b>			
Lubricante ISO 32	6,7	\$ 278,74	\$ 648.527,31
Lubricante ISO 38	6,7	\$ 294,37	\$ 684.907,85
<b>Total Productos</b>	13,3	\$ 286,55	\$ 1.333.435,16
Margen			\$ 895.797,91
<b>BASE CALCULO DE COSTO ALTERNATI VA 2</b>			
<b><i>Materia Prima</i></b>	<b>Cantidad requerida,</b>	<b>Precios, USD\$/BL</b>	<b>Precios, USD\$/año</b>
Bases Paráfinica M, BPD	6,7	\$ 80,00	\$ 186.133,33
Aditivo Lubrizol, kg	12,9	\$ 11,88	\$ 53.330,16
Depresor de Fluidez, kg	1,8	\$ 11,08	\$ 7.085,50
Bases Paráfinica L, BPD	6,7	\$ 80,00	\$ 186.133,33
<b>Total MP</b>	13,3	\$ 52,98	\$ 432.682,32
<b><i>Productos</i></b>			
Lubricante ISO 32	6,7	\$ 278,74	\$ 647.295,11
Lubricante ISO 38	6,7	\$ 294,37	\$ 683.606,52
<b>Total Productos</b>	13,3	\$ 286,55	\$ 1.327.840,56
Margen			\$ 895.158,23

Comparando las dos alternativas de elaboración de bases lubricantes se concluye que la elaboración de lubricantes con aditivos que suministra la empresa LUBRIZOL es financieramente la opción más viable por un ligero margen de diferencia (ver Tablas 11, 12, 13 y 14).

Tabla 16. Análisis económico alternativa 1 de producción de lubricantes ISO 32 e ISO 68.

PROYECTO: PRODUCCION DE LUBRICANTES ISO 32 E ISO 38												
<b>BASES DE LA EVALUACIÓN</b>												
INVERSION FIJA ESTIMADA, MUS\$	\$	430,00										
FINANCIACIÓN, %		0%										
TASA DE INTERÉS ANUAL DEL CREDITO, EN DOLARES, %		8%										
PLAZO DE PAGO, AÑOS		10										
INVERSION EN CAPITAL DE TRABAJO, %		16%										
SEGUROS, % DE INVERSION		0,20%										
COSTO INCREMENTAL DE MANTENIMIENTO		5,00%										
TIEMPO DE VIDA DEL PROYECTO, AÑOS		10										
DEPRECIACION, %		10,00%										
IMPUESTOS DE RENTA, %		34,00%										
INFLACION ANUAL USA, %		5,00%										
DIAS DE OPERACION PLANTA		348										
FLETE TRANSPORTE BARRANCA - BARRANCA, COL\$/BARRIL-KM	\$	37,56										
TASA DE CAMBIO COL\$/USD\$	\$	3.000,00										
DISTANCIA BARRANCA - BARRANQUILLA, KM		620										
SALARIO MINIMO, COL\$	\$	737.717										
NUMERO DE OPERARIOS POR TURNO, UN.		3										
NUMERO DE TURNOS, UN.		3										
FACTOR PRESTACIONAL		2,5										
ADMINISTRACION, %		3,00%										
COSTOS DE PRODUCCION, %		13,00%										
PRE-COMISION Y COMISION DE ARRANQUE		15,00%										
<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA</b>												
<b>AÑO</b>		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
PLANTA & EQUIPOS, MUS\$		415,00										
LICENCIA DE LA TECNOLOGIA, MUS\$		4,90										
PARTES DE ESPERA, MUS\$		3,20										
CARGA INICIAL CATALIZADOR & QUIMICOS, MUS\$		6,90										
<b>TOTAL INVERSION, MUS\$</b>		<b>430,00</b>										
PRE-COMISION Y COMISION, MUS\$		64,50										
FINANCIACION, MUS\$		0,00										
CAPITAL DE TRABAJO, MUS\$			219,99									-219,99
<b>INGRESOS POR VENTA DE PRODUCTOS, MUS\$</b>												
LUBRICANTE ISO 32		648,53										
LUBRICANTE ISO 38		684,91										
<b>VENTAS TOTALES, MUS\$</b>		<b>1333,44</b>	<b>1470,11</b>	<b>1543,62</b>	<b>1620,80</b>	<b>1701,84</b>	<b>1786,93</b>	<b>1876,28</b>	<b>1970,09</b>	<b>2068,60</b>	<b>2172,03</b>	
<b>COSTOS VARIABLES INCREMENTALES, MUS\$:</b>												
COSTOS MATERIA PRIMA, MUS\$		264,08	205,21	215,47	226,25	237,56	249,44	261,91	275,00	288,75	303,19	
COSTOS LOGISTICOS, MUS\$		37,93	39,82	41,81	43,91	46,10	48,41	50,83	53,37	56,04	58,84	
COSTOS DE PRODUCCION, MUS\$		182,01	191,11	200,67	210,70	221,24	232,30	243,92	256,11	268,92	282,36	
<b>COSTOS TOTALES VARIABLES, MUS\$</b>		<b>484,02</b>	<b>436,15</b>	<b>457,96</b>	<b>480,86</b>	<b>504,90</b>	<b>530,14</b>	<b>556,65</b>	<b>584,48</b>	<b>613,71</b>	<b>644,39</b>	
<b>COSTOS FIJOS INCREMENTALES, MUS\$</b>												
COSTOS PERSONAL PLANTA, MUS\$		69,71	73,20	76,86	80,70	84,74	88,98	93,42	98,09	103,00	108,15	
COSTOS ADMINISTRATIVOS, MUS\$		13,55	14,22	14,93	15,68	16,46	17,29	18,15	19,06	20,01	21,01	
DEPRECIACION, MUS\$		45,15	47,41	49,78	52,27	54,88	57,62	60,51	63,53	66,71	70,04	
MANTENIMIENTO, MUS\$		22,58	23,70	24,89	26,13	27,44	28,81	30,25	31,77	33,35	35,02	
INTERESES DE FINANCIACION, MUS\$		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SEGUROS, MUS\$		0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,21	1,27	1,33	1,40	
<b>COSTO FIJOS TOTALES, MUS\$</b>		<b>151,89</b>	<b>159,48</b>	<b>167,46</b>	<b>175,83</b>	<b>184,62</b>	<b>193,85</b>	<b>203,54</b>	<b>213,72</b>	<b>224,41</b>	<b>235,63</b>	
COSTOS TOTALES, MUS\$		635,91	595,63	625,41	656,68	689,52	723,99	760,19	798,20	838,11	880,02	
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO (MUS\$)		697,53	874,48	918,20	964,11	1012,32	1062,94	1116,08	1171,89	1230,48	1292,01	
IMPUESTOS (MUS\$)		260,88	327,06	343,41	360,58	378,61	397,54	417,42	438,29	460,20	483,21	
<b>UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS (MUS\$)</b>		<b>436,65</b>	<b>547,42</b>	<b>574,80</b>	<b>603,54</b>	<b>633,71</b>	<b>665,40</b>	<b>698,67</b>	<b>733,60</b>	<b>770,28</b>	<b>808,80</b>	
AMORTIZACION PRESTAMO		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
<b>FLUJO DE CAJA (MUS\$ CORRIENTES)</b>		<b>-494,50</b>	<b>261,81</b>	<b>594,83</b>	<b>624,57</b>	<b>655,80</b>	<b>688,59</b>	<b>723,02</b>	<b>759,17</b>	<b>797,13</b>	<b>836,99</b>	<b>1098,83</b>
<b>FLUJO DE CAJA (MUS\$ CONSTANTES)</b>		<b>-494,50</b>	<b>249,35</b>	<b>539,53</b>	<b>539,53</b>	<b>539,53</b>	<b>539,53</b>	<b>539,53</b>	<b>539,53</b>	<b>539,53</b>	<b>539,53</b>	<b>674,58</b>
<b>TASA INTERNA DE RETORNO A 10 AÑOS (US\$ CONSTANTES)</b>												82,4%
<b>TIEMPO DE RECUPERACION DE LA INVERSION (AÑOS):</b>												1,3

Tabla 17. Análisis económico alternativa 2 de producción de lubricantes ISO 32 e ISO 68.

PROYECTO: PRODUCCION DE LUBRICANTES ISO 32 e ISO 38												
<b>BASES DE LA EVALUACIÓN</b>												
INVERSION FIJA ESTIMADA, MUS\$	\$	430,00										
FINANCIACIÓN, %		0%										
TASA DE INTERÉS ANUAL DEL CREDITO, EN DOLARES, %		8%										
PLAZO DE PAGO, AÑOS		10										
INVERSION EN CAPITAL DE TRABAJO, %		16%										
SEGUROS, % DE INVERSION		0,20%										
COSTO INCREMENTAL DE MANTENIMIENTO		5,00%										
TIEMPO DE VIDA DEL PROYECTO, AÑOS		10										
DEPRECIACIÓN, %		10,00%										
IMPUESTOS DE RENTA, %		34,00%										
INFLACION ANUAL USA, %		5,00%										
DIAS DE OPERACION PLANTA		349										
FLETE TRANSPORTE	\$	-										
FLETE TRANSPORTE	\$	-										
TASA DE CAMBIO COL\$ / US\$	\$	3,000,00										
DISTANCIA BARRANCA - BARRANQUILLA, KM		620										
DISTANCIA CARTAGENA - BARRANQUILLA, KM		119										
SALARIO MINIMO, COL\$	\$	737,717										
NUMERO DE OPERARIOS POR TURNO, UN.		3										
NUMERO DE TURNOS, UN.		3										
FACTOR PRESTACIONAL		2,5										
ADMINISTRACION, %		3,00%										
COSTOS DE PRODUCCION, %		13,00%										
PRE-COMISION Y COMISION DE ARRANQUE		15,00%										
<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA</b>												
<b>AÑO</b>		<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
PLANTA & EQUIPOS, MUS\$		414,00										
LICENCIA DE LA TECNOLOGIA, MUS\$		4,39										
PARTES DE ESPERA, MUS\$		2,34										
CARGA INICIAL CATALIZADOR & QUIMICOS, MUS\$		9,25										
<b>TOTAL INVERSION, MUS\$</b>		<b>429,98</b>										
PRE-COMISION Y COMISION, MUS\$		64,50										
FINANCIACION, MUS\$		0,00										
CAPITAL DE TRABAJO, MUS\$			212,94									-212,94
<b>INGRESOS POR VENTA DE PRODUCTOS, MUS\$</b>												
Lubricante ISO 32		647,30										
Lubricante ISO 38		683,61										
		0,00										
		0,00										
<b>VENTAS TOTALES, MUS\$</b>		<b>1330,90</b>	<b>1467,32</b>	<b>1540,69</b>	<b>1617,72</b>	<b>1698,61</b>	<b>1783,54</b>	<b>1872,71</b>	<b>1966,35</b>	<b>2064,67</b>	<b>2167,90</b>	
<b>COSTOS VARIABLES INCREMENTALES, MUS\$:</b>												
COSTOS MATERIA PRIMA, MUS\$		258,88	271,82	285,41	299,68	314,67	330,40	346,92	364,27	382,48	401,60	
COSTOS LOGISTICOS, MUS\$		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
COSTOS DE PRODUCCION, MUS\$		181,67	190,75	200,29	210,30	220,82	231,86	243,45	255,63	268,41	281,83	
<b>COSTOS TOTALES VARIABLES, MUS\$</b>		<b>440,54</b>	<b>462,57</b>	<b>485,70</b>	<b>509,99</b>	<b>535,48</b>	<b>562,26</b>	<b>590,37</b>	<b>619,89</b>	<b>650,88</b>	<b>683,43</b>	
<b>COSTOS FIJOS INCREMENTALES, MUS\$</b>												
COSTOS PERSONAL PLANTA, MUS\$		69,71	73,20	76,86	80,70	84,74	88,98	93,42	98,09	103,00	108,15	
COSTOS ADMINISTRATIVOS, MUS\$		13,54	14,22	14,93	15,65	16,46	17,29	18,15	19,06	20,01	21,01	
DEPRECIACION, MUS\$		45,15	47,41	49,78	52,26	54,88	57,62	60,50	63,53	66,70	70,04	
MANTENIMIENTO, MUS\$		22,57	23,70	24,89	26,13	27,44	28,81	30,25	31,76	33,35	35,02	
* INTERESES DE FINANCIACIÓN, MUS\$		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
SEGUROS, MUS\$		0,90	0,95	1,00	1,05	1,10	1,15	1,21	1,27	1,33	1,40	
<b>COSTO FIJOS TOTALES, MUS\$</b>		<b>151,88</b>	<b>159,48</b>	<b>167,45</b>	<b>175,82</b>	<b>184,62</b>	<b>193,85</b>	<b>203,54</b>	<b>213,72</b>	<b>224,40</b>	<b>235,62</b>	
COSTOS TOTALES, MUS\$		592,43	622,05	653,15	685,81	720,10	756,10	793,91	833,61	875,29	919,05	
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO (MUS\$)		738,47	845,27	887,53	931,91	978,51	1027,43	1078,80	1132,74	1189,38	1248,85	
IMPUESTOS (MUS\$) (RENDA + COMBUSTIBLE)		261,08	287,39	301,76	316,85	332,69	349,33	366,79	385,13	404,39	424,61	
<b>UTILIDAD DESPUES DE IMPUESTOS (MUS\$)</b>		<b>487,39</b>	<b>557,88</b>	<b>585,77</b>	<b>615,06</b>	<b>645,81</b>	<b>678,10</b>	<b>712,01</b>	<b>747,61</b>	<b>784,99</b>	<b>824,24</b>	
AMORTIZACION PRESTAMO		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
<b>FLUJO DE CAJA (MUS\$ CORRIENTES)</b>		<b>-429,98</b>	<b>319,60</b>	<b>605,28</b>	<b>635,55</b>	<b>667,32</b>	<b>700,69</b>	<b>735,73</b>	<b>772,51</b>	<b>811,14</b>	<b>851,69</b>	<b>1107,22</b>
<b>FLUJO DE CAJA (MUS\$ CONSTANTES)</b>		<b>-429,98</b>	<b>304,38</b>	<b>549,01</b>	<b>549,01</b>	<b>549,01</b>	<b>549,01</b>	<b>549,01</b>	<b>549,01</b>	<b>549,01</b>	<b>549,01</b>	<b>679,74</b>
TASA INTERNA DE RETORNO A 10 AÑOS (US\$ CONSTANTES)												99,2%
TIEMPO DE RECUPERACION DE LA INVERSION (AÑOS):												1,2

**Tabla 18. Comparación de recuperación de la inversión y tasa de retorno de las alternativas para la elaboración de lubricantes.**

	<b>ALTERNATIVA 1</b>	<b>ALTERNATIVA 2</b>
<b>TASA INTERNA DE RETORNO A 10 AÑOS (US\$ CONSTANTES)</b>	82%	99%
<b>TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN (AÑOS):</b>	1,3	1,2%

Del análisis económico se concluye que este proyecto es financieramente viable y rentable y que teniendo en cuenta que es un proyecto que está encaminado a que ECOPETROL S.A. adquiera la experiencia de fabricación de lubricantes, se recomienda realizar estudios para la producción de otras líneas de lubricantes.

**4.3.9 Definición de equipos de laboratorio para la caracterización de los lubricantes** De forma complementaria y con objeto de establecer un control de calidad en el proceso de producción, se definieron qué equipos adicionales se requieren en el Laboratorio Industrial de la GRB para la caracterización de lubricantes, con base en las normas internacionales para la caracterización y control de calidad.

El Laboratorio Industrial de la GRB cuenta con la infraestructura y la idoneidad para realizar las pruebas que se requieren a los lubricantes, teniendo en cuenta que realiza pruebas de calidad a las bases, materia prima de lubricantes. De acuerdo con las visitas realizadas a sus instalaciones se pudo verificar que el laboratorio cuenta con los equipos para realizar los análisis físico-químicos mostrados en la Tabla 18.

**Tabla 19. Análisis físico-químicos que realiza el Laboratorio Industrial de la GRB a las bases lubricantes.**

<b>ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO</b>	<b>Método ASTM</b>
Color ASTM	D1500
Corrosión lámina de cobre, 3 horas a 100°C	D130
Contenido de agua y sedimento	D96
Índice de Viscosidad	D2270
Numero de Neutralización	D664
Punto de Fluidez	D 97
Punto de Inflamación	D92
Residuo carbón Conradson	D4530
Tiempo de separación de la emulsión	D1401
Viscosidad a 100°C (212°F)	D445
Viscosidad a 40°C (104°F)	D445
Ceniza	D482
Densidad a 60°C	D4052-11
Gravedad API	D4052-11

Adicional a los análisis de calidad que se realizan a las bases lubricantes, se requiere otros análisis para evaluar el desempeño de los lubricantes:

- Sedimentos y partículas: los sedimentos no magnéticos de una muestra que, por lo demás, tiene un aspecto claro y brillante, pueden delatar la presencia de suciedad, polvo o contaminación de arena. Las partículas magnéticas pueden indicar oxidación o un desgaste importante.
- Análisis espectrométrico ASTM D5185: es una prueba rápida y sofisticada para determinar algunos parámetros, incluyendo contaminación con combustible, agua, glicol y hollín; también detecta productos de la degradación del lubricante como compuestos de oxidación, nitración y sulfatación; así como la presencia de aditivos como el dialquil ditiofosfato de cinc (ZDDP) y fenoles.

- Análisis de elementos metálicos: a veces llamada análisis de metales de desgaste. Está diseñada para determinar la concentración de metales de desgaste, contaminantes y aditivos en el lubricante.
  - Conteo de partículas: el conteo de partículas mide el tamaño y la cantidad de partículas en el lubricante. Existen varias metodologías para evaluar el contenido de partículas, típicamente reportado con el estándar ISO 4406:99.
  - Prueba de carga a soldadura por cuatro bolas: el objetivo de esta prueba es determinar la capacidad del lubricante en condiciones de alta velocidad y baja carga. Al final de la prueba se desmonta el conjunto y se mide la profundidad de las huellas causadas por la fricción de las cuatro bolas; estas mediciones son promediadas y se reportan como diámetro de desgaste.
- Existen en el mercado una variedad de estos equipos, que bajo la norma ASTM realizan los análisis anteriormente relacionados; incluso hay equipos que realizan pruebas múltiples y que realizan la labor de forma automática (ver Figura 31).

**Figura 35: Equipo multifuncional para el análisis de lubricantes**



Sistema automatizado para análisis de lubricantes, con 4 módulos:

1. Espectrómetro infrarrojo para pruebas TBN, oxidación, hollín, agua y glicol.
2. Viscosímetro para pruebas de viscosidad cinemática a 40<sup>0</sup> C y a 100<sup>0</sup> C.
3. Contador de partículas
4. Espectrómetro OES para pruebas de 20 metales de desgaste.

Fuente: Kreismaschinen Ltda.

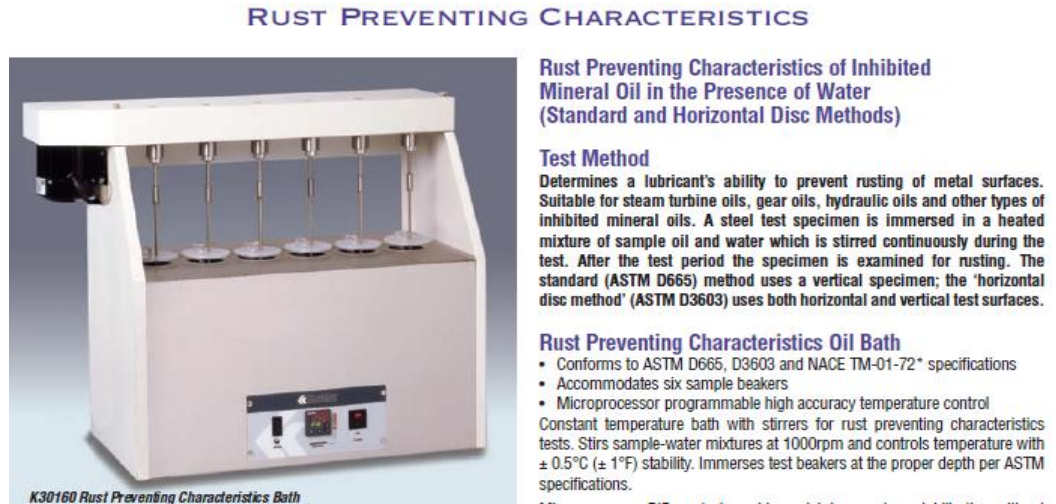
**Figura 36. Equipo para análisis de aeroemulsión.**



Fuente: KOEHLER INSTRUMENT Co.

- Aeroemulsión (ASTM D3427): es una emulsión formada por aire y aceite, en el cual el tamaño de las burbujas de aire es inferior al de las burbujas de aceite en la capa superficial del aceite y se encuentran en el intervalo de  $10^{-4}$  y  $10^{-1}$  cm. Las aeroemulsiones van en detrimento de las cualidades lubricantes del aceite y se miden por el tiempo que tarda un volumen de aceite de un área dada en liberar el aire atrapado utilizando un procedimiento estándar (Figura 32).
- Análisis de herrumbre ASTM D665: Determina la habilidad del lubricante a prevenir herrumbre en las superficies de los metales (Figura 33).

Figura 37. Equipo para el análisis de herrumbre en lubricantes.



Fuente: KOEHLER INSTRUMENT Co.

- Como valor agregado al suministro de lubricantes se debe adquirir un laboratorio portátil de aceites lubricantes con el que se realice análisis de desempeño del lubricante en sitio. Con un equipo portátil como el mostrado en la Figura 34, además de ser de fácil transporte, se obtienen resultados analíticos inmediatos, facilitando pronta toma de decisiones, sin la espera de los resultados de un laboratorio y se detecta con precisión daños potenciales, antes de que afecten a los equipos.

**Figura 38. Laboratorio portátil para analizar el estado y desempeño de los lubricantes.**



Fuente: Kreismaschinen Ltda.

## 5. CONCLUSIONES

- Se recopiló información valiosa y útil del proceso de producción de bases lubricantes, todas las causas-raíz y recomendaciones de varios trabajos de investigación desarrollados tanto en la GRB como en el ICP para la producción de bases lubricantes.
- Se identificaron todas las variables que afectan el proceso de producción de bases lubricantes, a las cuales se tiene acceso de datos experimentales que finalmente se analizaron y evaluaron generando recomendaciones.
- Del análisis de la operación de las unidades de proceso para la producción de bases lubricantes se concluye:
  - El proceso de hidrotreatmento es un proceso limpio. Su operación no afecta la calidad de la bases, pues su objetivo es mejorar color y estabilidad a lo oxidación principalmente.
  - Es posible procesar desparafinado con VI por debajo de 25, siempre y cuando el punto inicial de ebullición se encuentre por encima de 320°C. y realizar corrección de calidad con inyección de VI, esto para darle valor agregado a la base con bajo VI.
  - Con el objetivo de eliminar componentes livianos que afectan la estabilidad operacional de dicha unidad, es necesario realizar el despojo de aceite desparafinado en la unidad de hidrotreatmento como proceso adicional a la producción de bases. Éste se debe realizar teniendo en cuenta los resultados del análisis de caracterización de tanques de almacenamiento que cargan a la unidad de extracción liquido-liquido.
- Para el diseño conceptual de la Planta de producción de Lubricantes ISO 38 e ISO 62 se concluye que:

- ECOPETROL S.A. está en plena capacidad para producir lubricantes industriales ya que produce la materia prima requerida para la elaboración de lubricantes industriales tipo I; cuenta con los equipos principales para adecuarlos para la producción de lubricantes industriales y personal calificado para el desarrollo y ejecución de este proyecto.
- Se debe emplear el aditivo, suministrado por LUBRIZOL por ser el que genera menos costos y la inversión que se realizaría a la planta de lubricante se recuperaría en 1.2 años. El lubricante se preparará con la formulación suministrada por el proveedor del paquete de aditivo (0.7% en peso de aditivo y 0.1% peso de depresor de fluidez)

## 6. RECOMENDACIONES

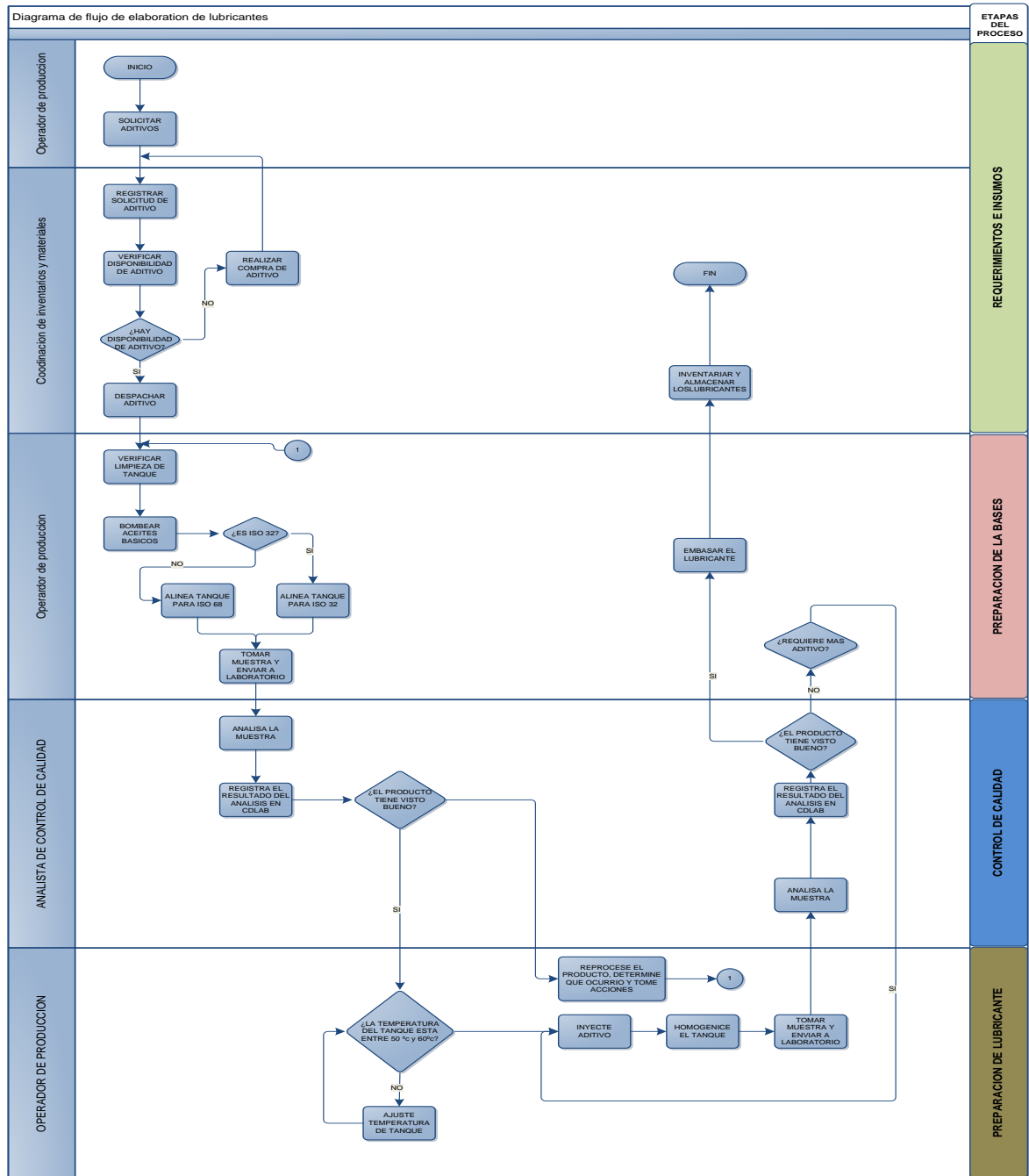
- El análisis causa-raíz del proceso de extracción líquido-líquido con fenol muestra algunos inconvenientes que dieron lugar al establecimiento de recomendaciones, varias de las cuales ya han sido ejecutadas:
  - Recuperación de la confiabilidad mecánica de intercambiadores de calor (E-756, E-757 y E759) y hornos. Aún falta el cambio de quemadores del H-751
  - La inspección de la torre de extracto T-753 mostró platos caídos y plato colector sin empaques, por lo que se realizó su intervención mecánica.
- Las acciones ejecutadas sobre el proceso de producción de bases lubricantes ha permitido incrementar el VI de 81 que venía presentando, a valores por encima de 90 reduciendo los costos de aditivos mejoradores de VI en alrededor de \$1000.000.000.
- Del análisis de causa raíz de arrastre de solvente con el desparafinado como carga a la unidad de extracción líquido-líquido se establecieron las siguientes observaciones y/o recomendaciones, algunas de las cuales fueron ejecutadas:
  - La carga al recobro de aceite desparafinado opera por encima del diseño. Se recomendó mantener en valores iguales o inferiores a la del diseño (480 bph) y temperatura de operación de 470°F (243°C). Esta recomendación se implementó desde el mes de Noviembre del 2016 obteniendo estabilidad en la operación del recobro de desparafinado.
  - La relación de vapor de despojo-producto que operaba a una relación de 6 lb vapor de despojo/barril de producto en la torre T-1202B, se ajustó a una relación de 9 LBH por barril de producto (alrededor de 1100 LBH).

- Se ajustó la concentración de solvente MEK-Tolueno a 50/50, puesto que ésta se encontraba en 40/60. Con ello se obtuvo equilibrio térmico en la unidad.
- Se ajustó la operación de las torres T-1201B y T-1202C a presiones menores que 15psig y 45 psig respectivamente con el fin de incrementar el despojo de solvente.
- Se debe implementar las acciones recomendadas para mejorar la eficiencia de transferencia de calor del E1246.
- Se recomienda la compra de una bomba dosificadora para la inyección de aditivo que tiene un costo aproximado de \$9.000.000.
- Se requiere la construcción de una línea de dos pulgadas y 185 metros de longitud con un costo aproximado de \$186.000.000 para rutear la base hasta los tanques de preparación del lubricante.

Finalmente, se describen las cuatro etapas del proceso de elaboración de lubricantes (ver Figura 35):

- Etapas 1. Requerimiento de insumos: involucra las actividades de aseguramiento de inventarios y despacho de insumos.
- Etapas 2. Almacenamiento de las bases lubricantes: en esta etapa, se realiza trasiego de las bases a los tanques de lubricantes, se verifica el estado del tanque de almacenamiento.
- Etapas 3. Control de calidad: en este proceso se realiza control de calidad a las bases y los lubricantes. Para ello, se utiliza patrones de aceites lubricantes. Si el producto no cumple con las especificaciones establecidas por el Laboratorio de Calidad, se procede a realizar reprocesos hasta conseguir un óptimo resultado.
- Etapas 4. Preparación de lubricante: etapa de mezclado de los aceites bases con el paquete de aditivo, homogenización y toma de muestra para visto bueno, posterior envasado y disposición final.

**Figura 39. Diagrama de flujo de la elaboración de aceites lubricantes dividido por etapas.**



## BIBLIOGRAFÍA

ALBARRACÍN G. Pedro R., Tribología y lubricación, Tomo Medellín 2015

AVELINO Santiago. Shell fundamentos de lubricantes. May 29, 2013 [en línea] disponible en: <http://www.slideshare.net/AvelinoSantiago/shell-fundamentos-de-lubricantes>

BALLESTEROS RODRÍGUEZ Catalina, MONSALVE JAIMES Sandra Liliana. Selección y evaluación cuantitativa de aditivos para la extracción Líquido-Líquido en la obtención de bases lubricantes. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico. Universidad Industrial de Santander (2004). Facultad de Ciencias Físico-Químicas.

BENLIOCH, J. M., Los Lubricantes. Barcelona: Ed CEAC 1990

BOOSER, E. R., Handbook of lubrication Volumen I. Boca Ratona, Florida: Ed CRC 1983

CALDERON, F. G., Diagnóstico y Propuesta de Mejora del Proceso de Control de la Calidad en una Empresa que elabora Aceites Lubricantes Automotrices e Industriales Utilizando Herramientas y Técnicas De La Calidad. Tesis de Grado, Pontificia Universidad Católica del Perú 2014

CRANE CO. Co., Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, McGraw-Hill, México, 1989.

ECOPETROL S.A. Análisis de soluciones. RCA U1200, Barrancabermeja. 2015.

ECOPETROL S.A. Análisis de soluciones. RCA U1200, Barrancabermeja. 2016.

ECOPETROL S.A. Análisis de soluciones. RCA U700, Barrancabermeja. 2014.

ECOPETROL S.A. ECOGCB-MEC-MDPU-CA02. Manual de descripción de proceso de la unidad (MDU) DE MEK.

FAJARDO German. Shell Lubricantes y lubricacion. 4 de mayo de 2016 [en línea] disponible en: <http://www.slideshare.net/germanfajardo/shell2-7887568>

GRANT. Eugene L. Grant Ireson, Principios de Ingeniería Económica. 1984. Edición CEC S.A.

INFORME ESTADÍSTICO PETROLERO (IEP) y de Taladros. Asociación Colombiana de Petróleo 2015 [en línea] disponible en: <https://www.acp.com.co/index.php/es/informe-estadistico-petrolero-iep>.

JAMIESON Suzy. Machinery Lubrication Laboratory-based Technician Skills to be standardized. [en línea] disponible en: <http://www.machinerylubrication.com/Read/29125/laboratory-technician-skills>

LA COMERCIALIZACIÓN DE LUBRICANTES EN COLOMBIA AKATIVA Servicios Financieros. [en línea] disponible en: [http://aktiva.com.co/app/webroot/blog/Estudios%20sectoriales/2015/comercio%20de%20lubricantes%20y%20aceites\\_blog.pdf](http://aktiva.com.co/app/webroot/blog/Estudios%20sectoriales/2015/comercio%20de%20lubricantes%20y%20aceites_blog.pdf)].

LATIN AMERICA Noria. Tendencia vs. Límites de desgaste. 4 de mayo de 2016 [en línea] disponible en: <http://noria.mx/lublearn/tendencia-vs-limites-de-desgaste/>

LONDOÑO, M., Jorge, G., Manual de operación de la unidad de desparafinado con MEK. Barrancabermeja 1997

MANG, T., and DRESEL, W., Lubricants and Lubrication, WILEY-VCH 2007

MÉNDEZ-SÁNCHEZ A. F., PÉREZ-TREJO L., PANIAGUA A. M. Mercado Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette), Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional, Edif. 9 Unidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Diciembre de 2009.

MEYERS Robert A., Handbook of petroleum refining processes. Tercera edición. 2004

MILLER, R. W. Lubricants and Theirs Applications. Tempe, Arizona: ED McGraw-Hill 1993

MORTIER, R.M., FOX, M.F., Chemistry and Technology of Lubricants, Springer, 2010.

PERRY Robert H., Manual del Ingeniero Químico. Sexta edición 2000

SMITH Julian C.– HARRIOT Peter. Operaciones unitarias en Ingeniería Química 4ª Edición. Warren L. McCabe - Editorial Mc Graw Hill.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO- QUÍMICAS. Material de estudio, Maestría profundización en Ingeniería química 2014-2015

WAUKIER J.P., El Refino del Petróleo, Paris, Francia: EDICIONES Technip,  
1994

## ANEXOS

### **ANEXO A. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS A LA UNIDAD DE RECOBRO DE ACEITE DESPARAFINADO (DISEÑO VERSUS CONDICIONES ACTUALES) UTILIZANDO LA HERRAMIENTA PROII-SIMSCI**

Esta simulación y las recomendaciones fueron entregadas al Departamento de Parafinas y fenol para su implementación.

#### **1) Simulación SIMSCI-PROII – 50%Wt MEK/50%Wt Tolueno (diseño).**

SIMSCI PROII

Simulación SIMSCI-PROII – 50%Wt Mek / 50%Wt Tolueno (diseño).

PRECONDICIONES

Operación el E1246

- 148720 LBH SOLVENTE (Mek-Tolueno).
- 41603 LBH DWO / 800 LBH Vapor despojo T1202B

RESULTADOS:

- %Wt TOLUENO A LA SALIDA T1202B (DWO producto): 0.374
- TEMPERATURA ENTRADA T1201A (°F):231

Cabe indicar que esta simulación reproduce la información de diseño entregada por la empresa FLUOR para la Ingeniería de detalle “actualización tecnológica de la MDU- Planta Parafinas GCB Balance de Masa”.

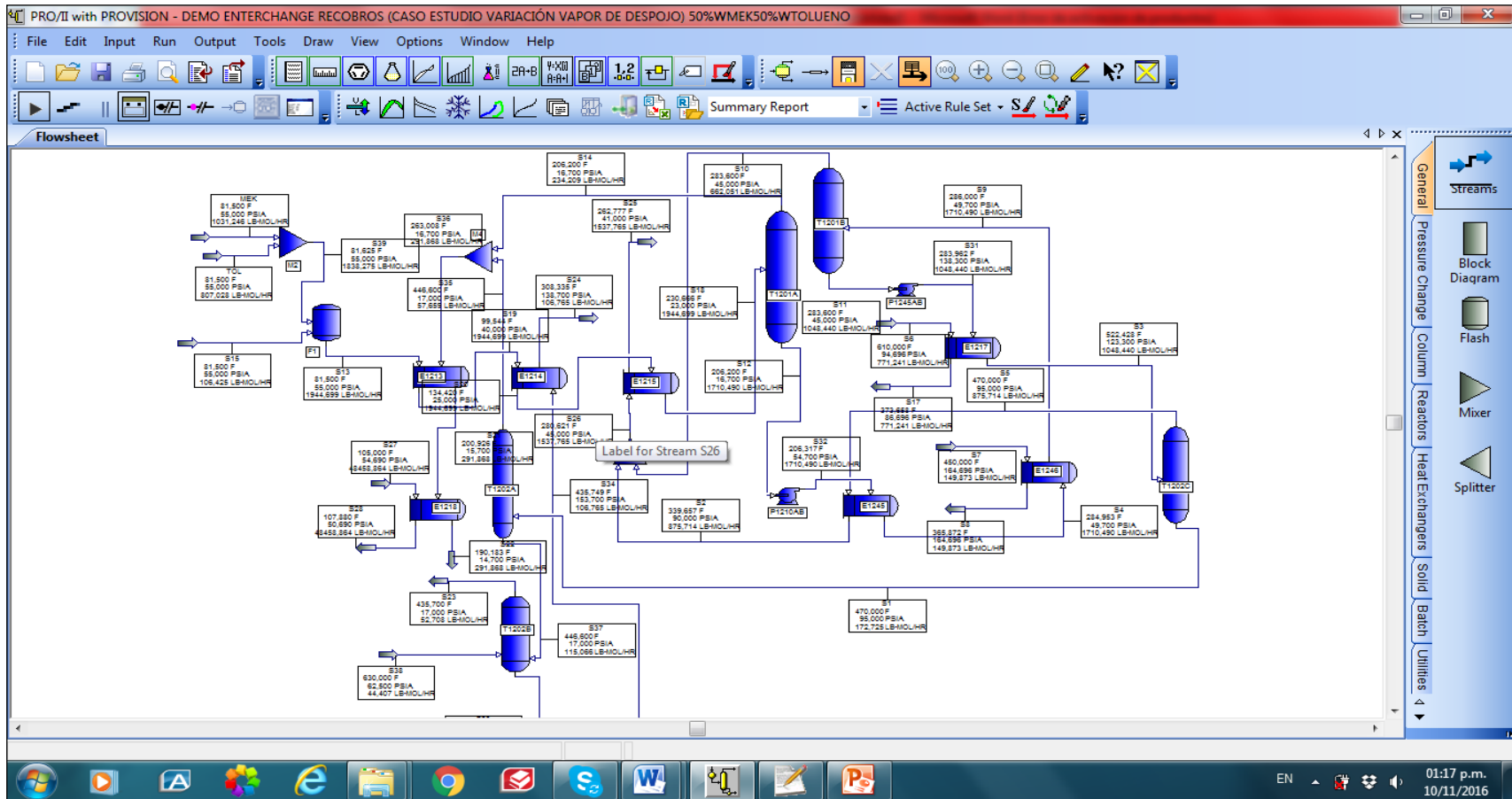
#### **2) Simulación SIMSCI-PROII – 40%Wt MEK/ 60%Wt Tolueno. (Condición actual)**

PRECONDICIONES:

Operación el E1246

- 148720 LBH SOLVENTE (Mek-Tolueno).
- 41603 LBH DWO / 800 LBH Vapor despojo T1202B

Figura 35 Diagrama de banderas unidad de recobro desparafinado.



Esta simulación no arroja resultados confiables, aparece un mensaje de error en la ejecución del programa. Lo anterior se puede explicar debido a que no existe vaporización de la mezcla MEK-TOLUENO a las condiciones de temperatura y presión de la T1201A, limitándose el intercambio térmico del E1213, ya que este equipo intercambia energía térmica con los vapores de cima de la T1201A (lado casco) y la corriente de carga a la unidad de recobro de desparafinado (lado tubos), la cual a su vez entra a la T1201A luego de pasar por el tren de precaliente.

### **3) Simulación SIMSCI-PROII – 40%Wt MEK / 60%Wt Tolueno. (condición actual).**

PRECONDICIONES:

Operación el E1246

- 148720 LBH SOLVENTE (Mek-Tolueno).
- 60000 LBH DWO / 800 LBH Vapor despojo T1202B

Se incrementa la cantidad de aceite desparafinado a la entrada de la unidad y se presenta una situación idéntica al caso anterior. (Mensaje de error).

Debido a lo presentado en las simulaciones 2 y 3 se decide realizar ajustes sobre el porcentaje en peso de Mek –Tolueno en el solvente, en aras de lograr encontrar resultados confiables en el modelo. En la siguiente simulación se realiza el de incrementar la concentración en peso de Mek en aras de llevarlo a las condiciones del diseño.

### **4) Simulación SIMSCI-PROII – 50%Wt Mek / 50%Wt Tolueno.**

PRECONDICIONES:

Operación E1246.

- 148720 LBH SOLVENTE (Mek-Tolueno).
- 60000 LBH DWO / 800 LBH Vapor despojo T1202B.

RESULTADOS:

- %Wt TOLUENO A LA SALIDA T1202B (DWO producto): 0.456.

- TEMPERATURA ENTRADA T1201A (°F): 232

Al disminuir el contenido de tolueno en el solvente y llevarlo hasta una concentración en peso de 50%, se observa que el modelo se ajusta y no genera ningún tipo de restricción, por el contrario se registra un incremento de 22% en el contenido de tolueno en la corriente de DWO producto con respecto al diseño, sin embargo se considera un valor muy bajo, ya que no supera el 1%Wt tolueno en el solvente.

Este caso en particular nos ayuda a comprender la importancia de mantener una concentración de MEK en el solvente no inferior a 50% en peso.

#### **5) Simulación SIMSCI-PROII – 49%Wt MEK / 51%Wt Tolueno.**

PRECONDICIONES:

- Operación E1246.
- 148720 LBH SOLVENTE (Mek-Tolueno).
- 60000 LBH DWO / 800 LBH Vapor despojo T1202B.

RESULTADOS:

Al ajustarse en el modelo una concentración en peso de Mek de 49% en la corriente de solvente en la unidad de recobro de desparafinado y manteniendo la misma cantidad másica de aceite, se presenta una situación idéntica al caso anterior. (Existe restricción en a T1201A, ya que no se presenta vaporización de solvente, lo cual generaría problemas cíclicos en el tren de calentamiento de la carga (E1213/E1214 y E12145). Lo anterior nos indica que concentraciones de Mek en el solvente que es utilizado en la unidad de recobro de desparafinado por debajo de 50% la unidad no opera adecuadamente.

Este caso en particular nos ayuda a comprender la importancia de mantener una concentración de Mek en la corriente de solvente no inferior a 50% en peso.

## 6) Simulación SIMSCI-PROII – 55%Wt Mek / 45%Wt Tolueno.

### PRECONDICIONES:

- Operación E1246.
- 148720 LBH SOLVENTE (Mek-Tolueno).
- 60000 LBH DWO / 800 LBH Vapor despojo T1202B.

### RESULTADOS:

- %Wt TOLUENO A LA SALIDA T1202B (DWO producto): 0.44
- TEMPERATURA ENTRADA T1201A (°F):229.

Al disminuir el contenido de tolueno en el solvente y llevarlo hasta una concentración en peso de 45%, se observa que el modelo se ajusta y no genera ningún tipo de restricción, por el contrario se registra una disminución de 3,5% en el contenido de tolueno en la corriente de DWO producto con respecto al caso anterior, sin embargo se sigue considerando un valor muy bajo, ya que no supera el 1%Wt tolueno en el solvente.

Los modelos realizados para concentraciones mayores a 45%Wt Tolueno en el solvente generan restricciones, lo cual nos indica que este es un parámetro de control importante a considerar, lo cual desde ahora se tendrá como ventana mínima de control para la operación del sistema de recobro de desparafinado.

**ANEXO B. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS A LA  
UNIDAD DE RECOBRO DE ACEITE DESPARAFINADO (CASOS DE ESTUDIO)  
UTILIZANDO LA HERRAMIENTA PROII-SIMSCI**

De acuerdo a los mejores resultados de porcentaje en peso de Mek-Tolueno obtenidos (Simulaciones 4 y 6, Anexo A1) para las condiciones actuales de la unidad, se realiza una serie de casos de estudio, los cuales buscan identificar oportunidades mejora. A continuación se presentan algunos resultados que por su importancia en la evaluación deben ser tenidos en cuenta:

**1) Caso estudio Simulación SIMSCI-PROII – variación de la cantidad de DWO (E1246 en servicio)**

PRECONDICIONES:

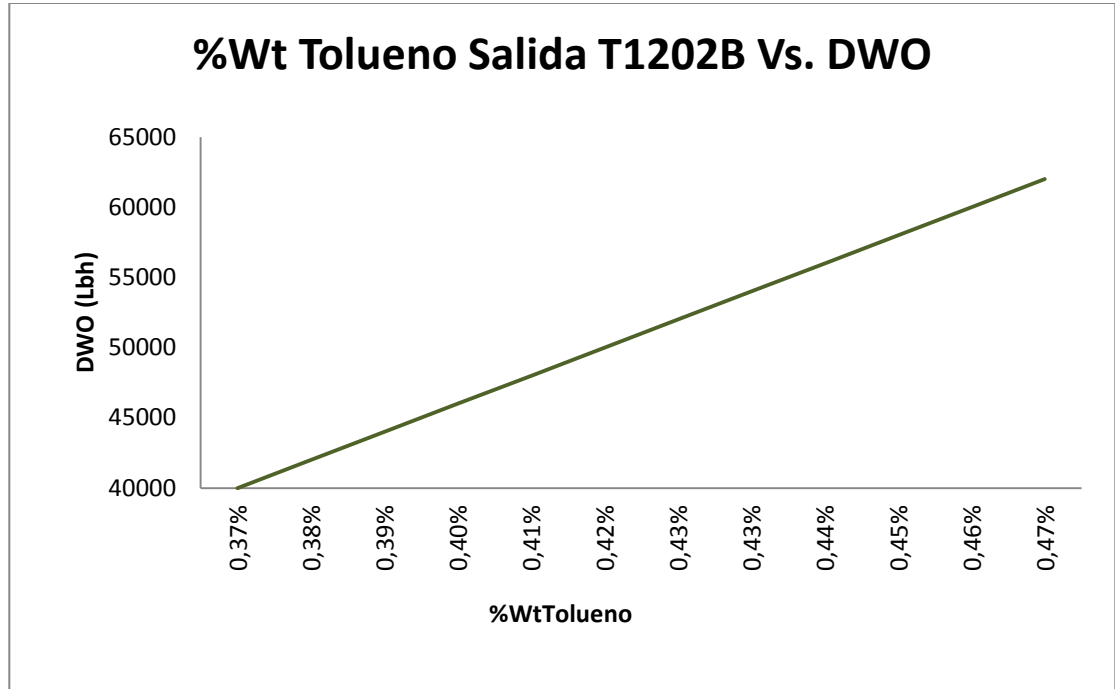
- 50%Wt MEK / 50%Wt Tolueno.
- 148720 LBH SOLVENTE (Mek-Tolueno).
- 60000 LBH DWO / 800 LBH Vapor despojo T1202B.

RESULTADOS

Existe una relación lineal directa entre el incremento de la cantidad en peso de aceite desparafinado (DWO) que es cargada a la unidad de recobro y el porcentaje en peso de tolueno saliendo por el fondo de la T1202B, en conclusión, podemos decir que al aumentarse la cantidad de aceite desparafinado como carga a la unidad de recobro, se incrementa de manera proporcional el porcentaje en peso de tolueno saliendo por el fondo de la torre. Lo anterior se debe a: mayores cantidades de aceite circulando por la unidad de recobro absorben mayor energía térmica (calor sensible) disponible del proceso y por ende la energía térmica necesaria para vaporizar el tolueno se disminuye generando mayores cantidades de este en fase líquida. Se recomienda operar la unidad de recobro con una cantidad no mayor a 60000lbh, cantidades mayores demandan mayores requerimientos

de energía térmica para calentar el aceite, descompensando térmicamente al sistema para que se dé la vaporización del Mek-Tolueno en las respectivas torres de despojo.

**Figura 36: Relación de la concentración de Tolueno con la cantidad de aceite desparafinado.**



**2) Caso estudio Simulación SIMSCI-PROII – variación de la cantidad de DWO (E1246 fuera de servicio).**

**RESULTADOS**

Los resultados son idénticos a los presentados en el caso 1, por lo cual se puede evaluar la posibilidad de no operar este equipo siempre y cuando se garantice un adecuado control en porcentaje en peso de MEK –Tolueno en el sistema (50%Wt MEK-50%Wt Tolueno).

**3) Caso estudio Simulación SIMSCI-PROII – variación de la cantidad de vapor de despojo en la T1202B**

**PRECONDICIONES**

- 50%Wt MEK / 50%Wt Tolueno.
- 148720 LBH SOLVENTE (Mek-Tolueno).
- 60000 LBH DWO / 800 LBH Vapor despojo T1202B.

## RESULTADOS

**Tabla 15. Relacion vapor de despojo en T1202B Vs contenido de solvente en el aceite desparafinado**

RELACIÓN VAPOR DE DESPOJO VERSUS PRODUCTO (LB/BL)	VAPOR DESPOJO T1202B (LBH)	PORCENTAJE TOLUENO SALIDA	
3.2676	600	0.544%	
3.5413	650	0.519%	
3.8151	700	0.496%	
4.089	750	0.476%	
4.363	800	0.457%	CONDICIÓN ACTUAL
4.6371	850	0.439%	
4.9113	900	0.423%	
5.1855	950	0.408%	
5.4598	1000	0.395%	
5.7342	1050	0.382%	
6.0086	1100	0.370%	
6.2831	1150	0.358%	
6.5577	1200	0.348%	
6.8323	1250	0.338%	
7.107	1300	0.328%	
7.3818	1350	0.319%	CONDICIÓN RECOMENDADA (30% REDUCCIÓN PÉRDIDAS)
7.6566	1400	0.311%	
7.9314	1450	0.303%	
8.2064	1500	0.295%	
8.4813	1550	0.288%	
8.7563	1600	0.281%	
9.0314	1650	0.275%	
9.3065	1700	0.269%	
9.5817	1750	0.263%	
9.8569	1800	0.257%	CONDICIÓN RECOMENDADO (44% REDUCCIÓN PÉRDIDAS)
10.132	1850	0.252%	
10.408	1900	0.246%	RIESGO DESPUÉS DE UNA RELACIÓN DE 10 ES
10.683	1950	0.241%	ARRASTRE DE ACEITE(DWO) EN LA CIMA DE LA T1202B
10.958	2000	0.237%	
11.234	2050	0.232%	
11.509	2100	0.227%	
11.785	2150	0.223%	
12.06	2200	0.219%	
12.336	2250	0.215%	
12.612	2300	0.211%	
12.888	2350	0.208%	

Los resultados obtenidos nos indican que al aumentar la relación de vapor despojo versus producto en la unidad de recobro de desparafinado se obtiene una menor cantidad del contenido de tolueno en la corriente de salida de la T1202B, registrándose reducciones de este compuesto con respecto a la condición actual de 30% y 40% para relaciones de vapor de despojo de 7.4 y 9.9 respectivamente. No se recomienda utilizar relaciones de vapor de

despojo superiores a 10, ya que existe riesgo de arrastre de aceite desparafinado (DWO) hacia la cima de la T1202B.

# ANEXO C. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS A LA UNIDAD DE RECUBRO DE ACEITE DESPARAFINADO (CASOS DE ESTUDIO 55%/MEK-45%TOLUENO) UTILIZANDO LA HERRAMIENTA PROII-SIMSCI

Stream (Summary)	UOM	S1	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S18	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Name		S1	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S18	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Description		DESDE T1202C HACIA T1202A	DESDE T1201B HACIA E1215	DESDE T1201B HACIA T1202C	DESDE T1201A HACIA E1245	FEED T1201A	DESDE T1201A HACIA E1213	DWO	SOLVENTE	DESDE E1215 HASTA T1201A	DESDE E1217 HASTA T1202C	DESDE E1245 HACIA T1246	DESDE T1202C HASTA E1245	ALC ENTRANDO E1217	Vapor 150#	HACIA CABEZAL DE CONDENSADO 25PSIG	DESDE E1246 HACIA T1201B
Phase		Liquid	Vapor	Liquid	Liquid	Liquid	Vapor	Liquid	Liquid	Liquid	Mixed	Liquid	Vapor	Liquid	Mixed	Mixed	Mixed
Thermodynamic System		PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01
Total Molar Rate	lb-mol / hr	187.4024886	357.0688156	558.8102287	915.8790539	1993.980615	1078.10156	141.8686056	1852.294009	1993.980615	558.8102287	915.8790539	371.4077167	446.0662233	149.8727766	149.8727766	915.8790539
Total Mass Rate	lb / hr	58248.47067	28800.52946	88825.96469	116012.8542	193630.7413	84992.73336	55850.65292	148720	193634.4928	91230.63147	116012.8542	31608.63877	104886.7642	2700	2700	120032.6413
Temperature	F	440.0000001	270	270	208.9999999	77.12862344	208.9999999	81.5	238.3939218	466.3221764	294.548542	440.0000001	649.9999999	450	365.2399377	306.1901354	306.1901354
Pressure	psia	45	29.69594301	29.69594301	15.1	55	15.1	55	40.03095281	137.2605334	54.46427433	45	94.69594301	164.695943	163.404105	54.25965259	54.25965259
Total Molecular Weight		310.8201556	80.65820425	158.9555068	126.6683124	97.10763479	78.83555363	394.1844232	80.28962966	97.10951618	163.2587067	126.6683124	85.1049597	235.1372033	18.01527977	18.01527977	131.0573058
Total Specific Enthalpy	BTU / lb	202.7912516	280.1700802	110.0633718	82.07714441	23.17028947	261.9373988	9.665421	26.53749585	104.5875721	245.0460041	127.9881791	341.3619421	324.1404588	1245.721146	585.7093246	138.3232608
Total Cp	BTU / lb F	0.822855202	0.401678609	0.52182158	0.493945393	0.43588799	0.377996707	0.437800821	0.44088417	0.526363494	0.59044931	0.542480493	0.460811304	0.872013626	0.552879367	0.933969637	0.538881729
Total Molar Component Rates	lb-mol / hr																
TOLUENE		34.1113505	152.433086	257.2985804	409.7316551	756.568329	346.836674		756.568329	756.568329	257.2985804	409.7316551	223.187202				409.7316551
H2O		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	149.8727766	149.8727766	0
MEK		12.46743761	204.6303215	159.8324811	364.4628042	1095.72568	731.2628754		1095.72568	1095.72568	159.8324811	364.4628042	147.9650293				364.4628042
NBP 439		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.491049615	0	0	0
NBP 454		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 488		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 510		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 535		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 563		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 588		0.083100426	0.00012355	0.091848706	0.081972254	0.092034047	6.17925E-05	0.092034047	0.092034047	0.091848704	0.091972254	0.088748278	40.47632444	0	0	0	0.091972254
NBP 612		1.564524064	0.001339164	1.682945248	1.682945248	1.682945248	0.000610241	1.682945248	1.682945248	1.682945248	1.682945248	1.682945248	1.163211559	44.27338227	0	0	1.682945248
NBP 635		2.133360329	0.001045239	2.244017283	2.244017283	2.244017283	0.00043261	2.244017283	2.244017283	2.244017283	2.244017283	2.244017283	1.118949298	46.39842479	0	0	2.244017283
NBP 659		3.204541506	0.00087983	3.318439486	3.318439486	3.318439486	0.000225589	3.318439486	3.318439486	3.318439486	3.318439486	3.318439486	1.113897908	30.819302399	0	0	3.318439486
NBP 684		4.737294599	0.000681014	4.847354116	4.847354116	4.847354116	0.000228369	4.847354116	4.847354116	4.847354116	4.847354116	4.847354116	1.110259439	25.67104779	0	0	4.847354116
NBP 712		7.269732	0.00050246	7.3767423	7.3767423	7.3767423	0.0001489	7.3767423	7.3767423	7.3767423	7.3767423	7.3767423	1.02942111	21.87764893	0	0	7.3767423
NBP 737		10.87038107	0.000374522	10.96796795	10.96796795	10.96796795	9.89542E-05	10.96796795	10.96796795	10.96796795	10.96796795	10.96796795	0.097606694	18.50240049	0	0	10.96796795
NBP 758		13.2020522	0.000252522	13.2820141	13.2820141	13.2820141	6.04208E-05	13.2820141	13.2820141	13.2820141	13.2820141	13.2820141	0.07996606	16.27213919	0	0	13.2820141
NBP 787		12.99477622	0.000109546	13.0397165	13.0397165	13.0397165	2.36737E-05	13.0397165	13.0397165	13.0397165	13.0397165	13.0397165	0.04459522	0	0	0	13.0397165
NBP 827		31.42203662	7.89239E-05	31.47021213	31.47021213	31.47021213	1.37705E-05	31.47021213	31.47021213	31.47021213	31.47021213	31.47021213	0.04804608	0	0	0	31.47021213
NBP 873		33.95689328	1.85392E-05	33.97746032	33.97746032	33.97746032	2.46794E-06	33.97746032	33.97746032	33.97746032	33.97746032	33.97746032	0.018766486	0	0	0	33.97746032
NBP 920		15.70548436	1.67117E-06	15.70839706	15.70839706	15.70839706	1.66439E-07	15.70839706	15.70839706	15.70839706	15.70839706	15.70839706	0.002912469	0	0	0	15.70839706
NBP 967		3.677323822	6.88768E-08	3.677537388	3.677537421	3.677537421	5.04267E-09	3.677537421	3.677537421	3.677537421	3.677537336	3.677537421	0.000213507	0	0	0	3.677537421
Total Molar Component Fractions	fraction																
TOLUENE		0.182021865	0.428901144	0.46043987	0.447364368	0.379426121	0.321710576		0.408449374	0.379426121	0.460439867	0.447364368	0.603922361	0	0	0	0.447364368
H2O		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
MEK		0.066527599	0.57308371	0.286022821	0.3979377	0.549516716	0.678287559		0.591550626	0.549516716	0.286022813	0.3979377	0.39677428				0.3979377
NBP 439		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00558484	0	0	0
NBP 454		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.029005125	0	0	0
NBP 488		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.076746606	0	0	0
NBP 510		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11846051	0	0	0
NBP 535		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.12228697	0	0	0
NBP 563		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.098939828	0	0	0
NBP 588		0.000443433	3.4601E-07	0.000164395	0.00010042	4.61559E-05	5.73161E-08	0.000649561	0.000649561	0.000164395	0.00010042	2.35544E-05	0.090740617	0	0	0	0.00010042
NBP 612		0.008350804	3.75044E-06	0.000308079	0.001836798	0.000439807	5.68033E-07	0.01187588	0.000308079	0.001836798	0.000308079	0.001836798	0.000312382	0.089252931	0	0	0.001836798
NBP 635		0.011353942	2.93008E-06	0.004015677	0.024512489	0.001261229	4.0127E-07	0.015846271	0.001261229	0.004015677	0.002451248	0.000297896	0.10443336	0	0	0	0.024512489
NBP 659		0.017099781	2.49494E-06	0.005398491	0.03082419	0.001864835	3.65958E-07	0.02342618	0.001864835	0.005398492	0.03082419	0.000306965	0.08930712	0	0	0	0.03082419
NBP 684		0.025278719	1.90723E-06	0.008974419	0.05293314	0.00243145	2.11825E-07	0.0243145	0.00243145	0.008974419	0.05293314	0.000293314	0.057549842	0	0	0	0.05293314
NBP 712		0.038792078	1.40718E-06	0.01319531	0.080851474	0.003689293	1.38113E-07	0.052046737	0.003689293	0.01319531	0.080851474	0.00027986	0.049045742	0	0	0	0.080851474
NBP 737		0.058005532	1.04888E-06	0.019627393	0.01197576	0.005500786	9.17856E-08	0.07413537	0.005500786	0.019627394	0.01197576	0.000262802	0.041479044	0	0	0	0.01197576
NBP 758		0.070447582	7.07207E-07	0.023768442	0.014502244	0.006661229	5.60437E-08	0.093744654	0.006661229	0.023768442	0.014502244	0.000215388	0.0364792	0	0	0	0.014502244
NBP 787		0.069341535	3.06792E-07	0.02334167	0.014237121	0.006539434	2.19587E-08	0.08203061	0.006539434	0.02334168	0.014237121	0.000120071	0.014237121	0	0	0	0.014237121
NBP 827		0.167671395	2.21033E-07	0.056316294	0.034036651	0.015782608	1.2773E-08	0.222111426	0.015782608	0.056316297	0.034036651	0.000129466	0.034036651	0	0	0	0.034036651
NBP 873		0.18120727	5.19206E-08	0.060803217	0.037098216	0.017040206	2.2891										


# ANEXO D. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS A LA UNIDAD DE RECUBRO DE ACEITE DESPARAFINADO (CASOS DE ESTUDIO 40%/MEK-60%/TOLUENO) UTILIZANDO LA HERRAMIENTA PROII-SIMSCI

Stream (Summary)	UOM	S1	S10	S11	S12	S13	S14	S16	S18	S19	S2	S26	S3	S4	S5	S7	S8	S9
Name		S1	S10	S11	S12	S13	S14	S16	S18	S19	S2	S26	S3	S4	S5	S7	S8	S9
Description		DESDE T1202C HACIA E1215	DESDE T1201B HACIA E1215	DESDE T1201B HACIA E1202C	DESDE T1201A HACIA E1205	FEED T1201A	DESDE T1201A HACIA E1213	SOLVENTE	DESDE E1215 HACIA T1201A	DESDE E1223 HACIA E1215	DESDE E1246 HACIA E1215	HACIA E1215	DESDE E1217 HACIA E1246	DESDE E1246 HACIA E1246	DESDE T1202C HACIA E1246	Vapor 150P	HACIA CABEZAL DE CONDENSADO 25P945	DESDE E1246 HACIA T1201B
Phase		Liquid	Vapor	Liquid	Liquid	Vapor	Liquid	Liquid	Mixed	Liquid	Mixed	Liquid	Vapor	Mixed	Liquid	Vapor	Mixed	Mixed
Thermodynamic System		PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1	PRO1
Total Molar Rate	lb-mol / hr	190,7801789	660,7159757	737,6344482	1398,350424	1935,735944	537,3854204	1793,431006	1935,735944	1935,735944	546,8542693	1207,570045	737,6344482	1398,350424	546,8542693	149,8727766	149,8727766	1398,350424
Total Mass Rate	lb / hr	59298,32489	54496,80237	107400,2085	152394,7332	204745,729	42952,57508	148720	194667,4625	204745,729	47263,86049	102301,0535	107273,5075	161876,0395	47267,32494	2700	2700	161876,0395
Temperature	F	440,000001	270	270	210	77,23980006	210	81,5	203,9634385	144,919868	288,2942033	258,0027373	456,6672248	297,9422256	440,000001	450	365,3427056	304,6406254
Pressure	psia	45	25,69594301	29,69594301	15,1	55	15,1	55	13,81398613	49,88930031	43,59215263	29,69594301	136,76930375	54,27096714	45	184,695943	163,6135062	53,6973207
Total Molecular Weight		310,6201556	82,48145368	145,6208579	108,9817907	105,7715253	79,93380006	82,9248516	100,5593399	105,7715253	86,4386212	84,71644113	145,4286336	115,7621417	86,4386212	18,01529797	18,01529797	115,7621417
Total Specific Enthalpy	BTU / lb	199,4850449	275,7774332	107,1948112	85,62191564	21,52932717	259,9731894	25,92492977	118,2174359	51,38615235	183,8983987	231,8442319	247,0872628	125,9447191	338,6012419	1245,721146	543,7517784	137,6659250
Total Cp	BTU / lb F	0,602955202	0,397143609	0,518600046	0,488733818	0,423495262	0,375249365	1,944716468	0,471096626	0,499776975	0,475724111	0,414169693	0,574370629	0,539452496	0,468372691	0,552870967	0,971575718	0,536984747
Total Molar Component Rates	lb-mol / hr																	
TOLUENE		39,85944007	342,0789673	416,70961	758,788577	968,4338847	209,645306	968,4338847	968,4338847	968,4338847	376,8501683	718,5291356	416,70961	758,788577	376,8501683	0	0	758,788577
H2O		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	149,8727766	149,8727766	0
MEK		9,869485357	318,6293511	178,6283468	497,2576997	824,9971208	327,7394200	824,9971208	824,9971208	824,9971208	168,7598605	487,3892116	178,6283468	497,2576997	168,7598605	0	0	497,2576997
NBP 439		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 454		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 488		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 510		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 536		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 563		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 588		0,07971082	0,000711329	0,091980296	0,092031374	0,09205242	2,074956-05	0,09205213	0,09205213	0,09205213	0,012118985	0,012220294	0,091980296	0,092031374	0,012118985	0	0	0,092031374
NBP 612		1,57192899	0,001983491	1,68482437	1,686715911	1,686921796	0,000250988	1,686921796	1,686921796	1,686921796	0,163042574	0,163042574	1,68482437	1,686715911	0,163042574	0	0	1,686715911
NBP 636		2,093546617	0,001451965	2,250186021	2,251636961	2,251782656	0,000145995	2,251782656	2,251782656	2,251782656	0,156693441	0,156693441	2,251636961	2,251636961	0,156693441	0	0	2,251636961
NBP 659		3,174867023	0,001230428	3,339176629	3,339470121	3,339519131	0,000112109	3,339519131	3,339519131	3,339519131	0,163289662	0,163289662	3,339176629	3,339470121	0,163289662	0	0	3,339470121
NBP 684		4,736462529	0,000979211	4,898155895	4,899135055	4,899215427	0,001761-05	4,899215427	4,899215427	4,899215427	0,161693451	0,162672682	4,898155895	4,899135055	0,161693451	0	0	4,899135055
NBP 711		7,326588483	0,000735917	7,48186375	7,48259558	7,482653267	5,367896-05	7,482653267	7,482653267	7,482653267	0,155275398	0,155011315	7,48186375	7,48259558	0,155275398	0	0	7,48259558
NBP 737		10,39949054	0,000339675	11,14289897	11,14442943	11,14446498	5,314818-05	11,14446498	11,14446498	11,14446498	0,144399226	0,144399226	11,14289897	11,14442943	0,144399226	0	0	11,14442943
NBP 757		13,41342291	0,00077229	13,53494112	13,53507129	13,53509376	2,240365-05	13,53509376	13,53509376	13,53509376	0,121271155	0,121271155	13,53494112	13,53507129	0,121271155	0	0	13,53507129
NBP 787		12,87457916	0,00016129	13,03933453	13,03946959	13,03950473	9,056296-06	13,03950473	13,03950473	13,03950473	0,064755594	0,064916873	13,03933453	13,03946959	0,064755594	0	0	13,03946959
NBP 827		31,40019066	0,000116604	31,47002498	31,47002498	31,47002498	5,32956-05	31,47002498	31,47002498	31,47002498	0,069902395	0,070019899	31,47002498	31,47002498	0,069902395	0	0	31,47002498
NBP 873		33,95015144	2,795015-05	33,97742584	33,97749398	33,97748095	9,688186-07	33,97748095	33,97748095	33,97748095	0,027320003	0,027320003	33,97742584	33,97749398	0,027320003	0	0	33,97749398
NBP 920		15,70415762	2,488897-06	15,70839865	15,70839865	15,70839865	6,627095-06	15,70839865	15,70839865	15,70839865	0,004239021	0,004241509	15,70839865	15,70839865	0,004239021	0	0	15,70839865
NBP 967		3,677226571	1,029956-07	3,677537355	3,677537419	3,677537421	2,03792E-09	3,677537421	3,677537421	3,677537421	0,00031085	0,00031085	3,677537355	3,677537419	0,00031085	0	0	3,677537419
Total Molar Component Fractions	fraction																	
TOLUENE		0,20829823	0,517739816	0,564928992	0,542831206	0,500292376	0,390120945	0,539989485	0,500292376	0,500292376	0,689123574	0,595361814	0,564928992	0,542831206	0,689123574	0	0	0,542831206
H2O		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
MEK		0,051726995	0,482248995	0,242183781	0,355603067	0,426193028	0,60897769	0,460016151	0,426193028	0,426193028	0,308601158	0,426193028	0,242183781	0,355603067	0,308601158	0	0	0,355603067
NBP 439		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 454		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 488		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 510		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 536		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 563		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 588		0,000417974	2,5932E-07	0,000124533	6,58142E-05	4,75541E-05	3,86053E-08	4,75541E-05	4,75541E-05	4,75541E-05	2,21612E-05	1,01777E-05	0,000124533	6,58142E-05	2,21612E-05	0	0	6,58142E-05
NBP 612		0,007976771	2,82041E-06	0,002284129	0,001206218	0,000871463	3,83124E-07	0,000871463	0,000871463	0,000871463	0,000298146	0,00013656	0,002284129	0,001206218	0,000298146	0	0	0,001206218
NBP 636		0,010973601	2,19796E-05	0,003950542	0,001616209	0,00116327	2,71118E-07	0,00116327	0,00116327	0,00116327	0,000286437	0,000130917	0,003950542	0,001616209	0,000286437	0	0	0,001616209
NBP 659		0,016941598	1,8622E-08	0,00452516	0,002389195	0,001721194	2,39816E-07	0,001721194	0,001721194	0,001721194	0,000299898	0,000136241	0,00452516	0,002389195	0,000299898	0	0	0,002389195
NBP 684		0,02463896	1,4820E-08	0,006943557	0,003950542	0,002530932	1,4820E-07	0,002530932	0,002530932	0,002530932	0,000299898	0,000134711	0,006943557	0,003950542	0,000299898	0	0	0,003950542
NBP 711		0,0384033	1,11382E-06	0,01043051	0,005351019	0,003895534	9,9884E-08	0,003895534	0,003895534	0,003895534	0,000283943	0,000129194	0,01043051	0,005351019	0,000283943	0	0	0,005351019
NBP 737		0,057655311	8,18904E-07	0,015107605	0,007969927	0,005757224	6,54059E-08	0,005757224	0,005757224	0,005757224	0,000284055	0,000120025	0,015107605	0,007969927	0,000284055	0	0	0,007969927
NBP 757		0,070308262	5,71044E-07															


# ANEXO E. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS A LA UNIDAD DE RECUBRO DE ACEITE DESPARAFINADO (CASOS DE ESTUDIO 50%/MEK-50%TOLUENO) UTILIZANDO LA HERRAMIENTA PROII-SIMSCI

Stream (Summary)	UOM	S1	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S3	S30	S31	S32	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Name		S1	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S3	S30	S31	S32	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Description		DESDE T1202C HACIA T1202A	DESDE T1201B HACIA E1215	DESDE T1201B HACIA T1202C	DESDE T1201A HACIA E1245	FEED T1201A	DESDE T1201A HACIA E1213	DWIO	SOLVENTE	DESDE E1217 HACIA T1202C	S30	S31	S32	DESDE E1245 HACIA E1246	DESDE T1202C HACIA E1245	ALC ENTRANDO E1217	Vapor 150H	HACIA CABEZAL DE CONDENSADO 2P SIG	DESDE E1246 HACIA T1201B
Phase		Liquid	Vapor	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Mixed	Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Water	Mixed
Thermodynamic System		PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01	PR01
Total Molar Rate	lb-mol / hr	173.4306963	945.4657598	854.7563513	1800.222111	1944.166169	143.9640563	105.9115312	1838.274639	854.7563497	105.7926442	854.7563513	1800.222111	1800.222111	681.3256637	788.5505531	149.8727766	149.8727766	1800.222111
Total Mass Rate	lb / hr	46989.04032	75234.84408	103858.0262	179124.5059	190291.2845	11121.57323	41666.12883	48720	103966.0217	41453.17146	103858.0262	179124.5059	179124.5059	56877.06996	180210.527	2700	2700	179200.8655
Temperature	F	469.9999999	286.7	286.7	206.2	77.85688138	206.2	81.5	81.5	462.0594813	436.3	287.0389006	206.317486	292.7748304	469.9999999	610	450	344.5425763	293.3440605
Pressure	psia	95	45	45	16.9	55	55	55	55	136.2303363	136.3	136.3	54.06804176	95	94.69594301	164.685943	164.6202669	52.83370764	
Total Molecular Weight		270.9384442	79.57437197	121.5060012	99.50133644	97.88017605	77.25242925	393.4050275	80.90194844	121.63232478	391.8341593	121.5060012	99.50133644	83.48000524	234.4810223	234.4810223	18.01527977	18.01527977	99.54376317
Total Specific Enthalpy	BTU / lb	216.9837254	286.3204165	120.017134	82.22198117	22.75274594	284.8372566	9.660986112	26.40700551	272.7339716	194.6604883	120.3806733	82.36496287	152.6093995	367.0837329	295.4812116	1245.721146	316.1157775	166.5506073
Total Cp	BTU / lb F	0.617461715	0.414476956	0.534861165	0.500648584	0.432642751	0.38203596	4.09807E+67	0.43717331	0.550965437	0.603084813	0.534215274	0.500447288	0.528811797	0.480840154	0.65151779	0.552870967	1.045088413	0.513999017
<b>Total Molar Component Rates</b>	lb-mol / hr																		
TOLUENE		46.60931353	352.328715	417.6910234	770.0197374	807.0282373	37.0086016	0	807.0282373	417.6910234	0	417.6910234	770.0197374	770.0197374	371.0817097	0	0	0	770.0197374
H2O		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	149.8727766	149.8727766	0
MEK		22.29669049	593.1261468	331.1627789	924.2909276	1031.2464	106.9564729	0	1031.2464	331.1627784	0	331.1627789	924.2909276	924.2909276	308.8660882	0	0	0	924.2909276
NBP 439		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 454		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 488		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 510		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 535		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 563		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NBP 588		0.057419305	0.000178087	0.068210251	0.068388338	0.068390007	2.56909E-06	0.068390007	0	0.068210251	0.068314137	0.068210251	0.068388338	0.068388338	0.010792046	69.40592098	0	0	0.068388338
NBP 612		1.101274773	0.001892536	1.252189823	1.254182349	1.25420775	2.54014E-05	1.25420775	0	1.252189823	1.252799887	1.252189823	1.254182349	1.254182349	0.150815044	76.13787828	0	0	1.254182349
NBP 636		1.522170006	0.001594777	1.672798999	1.674393759	1.67441162	1.78909E-05	1.67441162	0	1.672798999	1.672632073	1.672798999	1.674393759	1.674393759	0.150622894	80.16004233	0	0	1.674393759
NBP 659		2.320717165	0.001395714	2.494610581	2.49600627	2.496019987	1.37174E-05	2.496019987	0	2.494610581	2.493229396	2.494610581	2.49600627	2.49600627	0.16386352	53.25703266	0	0	2.49600627
NBP 684		3.481347624	0.001159062	3.652133364	3.653292388	3.653302291	9.90263E-06	3.653302291	0	3.652133363	3.649201413	3.652133364	3.653292388	3.653292388	0.170785722	44.6363234	0	0	3.653292388
NBP 711		5.415487772	0.000912327	5.589169466	5.590082336	5.590088982	6.64604E-06	5.590088982	0	5.589169465	5.589169465	5.589169466	5.590082336	5.590082336	0.173681668	38.28860281	0	0	5.590082336
NBP 737		8.164216283	0.000693817	8.333961833	8.334655567	8.334659885	4.3139E-06	8.334659885	0	8.333961833	8.325304124	8.333961833	8.334655567	8.334655567	0.169745514	32.44261046	0	0	8.334655567
NBP 757		9.98881736	0.000508674	10.13827227	10.13827083	10.13827364	2.80921E-06	10.13827364	0	10.13827226	10.12789216	10.13827227	10.13827083	10.13827083	0.149944853	28.66300561	0	0	10.13827083
NBP 787		9.601336066	0.000232327	9.666977648	9.667209874	9.667211057	1.17791E-06	9.667211057	0	9.666977648	9.676337039	9.666977648	9.667209874	9.667209874	0.065641531	0	0	0	9.667209874
NBP 827		23.27910586	0.000179605	23.37943537	23.37961473	23.37961542	6.9021E-07	23.37961542	0	23.37943536	23.35337151	23.37943537	23.37961473	23.37961473	0.100329383	0	0	0	23.37961473
NBP 873		25.19886325	4.60793E-05	25.24249307	25.24229519	25.24229532	1.24695E-07	25.24229532	0	25.24249306	25.21396052	25.24249307	25.24229519	25.24229519	0.043369594	0	0	0	25.24229519
NBP 920		11.66245662	4.5621E-06	11.66996134	11.6699679	11.6699679	8.4728E-09	11.6699679	0	11.66996134	11.66996134	11.6699679	11.6699679	11.6699679	0.007505682	0	0	0	11.6699679
NBP 967		2.731471289	2.07593E-07	2.73208834	2.732088519	2.73208852	2.5858E-10	2.73208852	0	2.732088339	2.729021716	2.73208834	2.732088519	2.732088519	0.000617037	0	0	0	2.732088519
<b>Total Molar Component Fractions</b>	fraction																		
TOLUENE		0.268748943	0.372609951	0.486666768	0.427735963	0.41509823	0.25707636	0	0.439013985	0.486666768	0	0.486666768	0.427735963	0.427735963	0.544646005	0	0	0	0.427735963
H2O		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
MEK		0.128562545	0.62739637	0.38743295	0.513431605	0.530431605	0.742931772	0	0.560896035	0.38743295	0	0.38743295	0.513431605	0.513431605	0.453331064	0	0	0	0.513431605

E755A.


																									
Área de tubo	565,4866776	in²																							
Número de tubos	172																								
ÁREA DE TRANSFERENCIA (a)	666	Ft²																							
ÁREA DE TRANSFERENCIA total (A)	97263,70856	in²	675,442421	Ft²																					
duty diseño (MBTU/h)	5,8																								
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA (U)	87	BTU/Ft²/h/°F																							
LADO TUBOS	UNID.	01/01/2016	02/01/2016	03/01/2016	04/01/2016	05/01/2016	07/01/2016		08/01/2016		09/01/2016		10/01/2016		11/01/2016		12/01/2016								
	°F (IN) (t1)	229,2	220,3	227,1	211,6	219,2	230	234	234,4	219	234	240,7	251	246	238,1	238	238	230,3	245	247	232,2	245	243	245	241
LADO CASCO	°F (OUT) (t2)	262,4	290,6	259	275,1	283	274	294,8	262	283	295,8	300	291	295	288	289	287,9	293	289	290,1	300	302	301	282	235,2
	°F (IN) (T1)	337,4	360,9	335,4	340,3	375	383	357,8	330	364	362,5	360	381	360,5	375	377	362,1	385	384	355,2	380	383	383	380	353,5
ESTIMACIÓN LMTD	°F (OUT) (T2)	309,4	341,3	314,7	322,9	318	346	346,8	316	347	353,4	355	357	351,1	342	344	339,3	359	355	338,2	358	361	360	349	338,6
	LMTD	75	70	76	65	92	109	63	68	81	67	60	90	66	87	88	74	92	95	65	80	81	82	98	118
ESTIMACIÓN DUTY	(T1-t2)	75	70	76	65	92	109	63	68	81	67	60	90	66	87	88	74	92	95	65	80	81	82	98	118
	(T2-t1)	80	121	88	111	99	116	113	82	128	119	114	106	105	104	106	101	129	110	91	126	116	117	104	98
	(T1-t2)/(T2-t1)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	ln((T1-t2)/(T2-t1))	0	-1	0	-1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	LMTD	78	93	82	86	95	112	85	75	103	91	84	98	84	95	97	87	109	102	77	101	97	98	101	108
EFICIENCIA TERMICA	(t2-t1)	33,2	70,3	31,9	63,5	63,8	44,0	60,8	27,6	64,0	61,8	59,3	40,0	49,0	49,9	51,0	49,9	62,7	44,0	43,1	67,8	57,0	58,0	37,0	-5,8
	(T1-t1)	108,2	140,6	108,3	128,7	155,8	153,0	123,8	95,6	145,0	128,5	119,3	130,0	114,5	136,9	139,0	124,1	154,7	139,0	108,2	147,8	138,0	140,0	135,0	112,5
	P= (t2-t1)/(T1-t1)	0,3	0,5	0,3	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3	-0,1
	(T1-T2)	28,0	19,6	20,7	17,4	57,0	37,0	11,0	14,0	17,0	9,1	5,0	24,0	9,4	33,0	33,0	22,8	26,0	29,0	17,0	22,0	22,0	23,0	31,0	14,9
	R= (T1-T2)/(t2-t1)	0,8	0,3	0,6	0,3	0,9	0,8	0,2	0,5	0,3	0,1	0,1	0,6	0,2	0,7	0,6	0,5	0,4	0,7	0,4	0,3	0,4	0,4	0,8	-2,6
	FACTOR DE CORRECCIÓN LMTD	0,94617793	0,94399422	0,96621942	0,94749775	0,8483543	0,95550461	0,96815762	0,9763663	0,96423133	0,97626755	0,98561684	0,96553664	0,97745179	0,93607264	0,9367265	0,94749702	0,95246419	0,95791066	0,9575734	0,94882071	0,95400392	0,9519951	0,96129401	1,0024869
	LMTD CORREGIDO	73	88	79	82	81	107	83	73	99	88	83	94	82	89	91	82	104	98	74	96	93	94	97	108
	DUTY CALCULADO (MBTU/h)	4,3	5,1	4,6	4,7	4,7	6,2	4,8	4,2	5,7	5,1	4,8	5,5	4,7	5,2	5,2	4,8	6,0	5,7	4,3	5,6	5,4	5,4	5,6	6,3
	DESAPROVECHAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA(%)	26,7	12,0	21,0	18,4	19,2		17,3	27,2	1,1	11,7	17,0	5,7	18,2	11,0	9,5	17,6		2,1	25,9	4,1	7,1	6,4	3,0	-7,8
	ESTIMACIÓN DE LA CAIDA DE PRESIÓN LADO TUBOS Y CARCASA INTERCAMBIADOR	(T1-T2)	28,0	19,6	20,7	17,4	57,0	37,0	11,0	14,0	17,0	9,1	5,0	24,0	9,4	33,0	33,0	22,8	26,0	29,0	17,0	22,0	22,0	23,0	31,0
(t2-t1)		33,2	70,3	31,9	63,5	63,8	44,0	60,8	27,6	64,0	61,8	59,3	40,0	49,0	49,9	51,0	49,9	62,7	44,0	43,1	67,8	57,0	58,0	37,0	-5,8
ΔT min		28,0	19,6	20,7	17,4	57,0	37,0	11,0	14,0	17,0	9,1	5,0	24,0	9,4	33,0	33,0	22,8	26,0	29,0	17,0	22,0	22,0	23,0	31,0	-5,8
ΔT máx = T1-t1		108,2	140,6	108,3	128,7	155,8	153,0	123,8	95,6	145,0	128,5	119,3	130,0	114,5	136,9	139,0	124,1	154,7	139,0	108,2	147,8	138,0	140,0	135,0	112,5
EFICIENCIA TERMICA INTERCAMBIADOR (ε)		0,26	0,14	0,19	0,14	0,37	0,24	0,09	0,15	0,12	0,07	0,04	0,18	0,08	0,24	0,24	0,18	0,17	0,21	0,16	0,15	0,16	0,16	0,16	0,23
ESTIMACIÓN DE LA CAIDA DE PRESIÓN LADO TUBOS Y CARCASA INTERCAMBIADOR	PSIG-(IN)	58	55	55	58	54	50	54	46	50	45	54	59	58	52	58	58	58	58	58	58	57	57	57	58
	PSIG-(OUT)	54	52	56	50	48	50	44	48	44	52	57	54	50	56	56	55	56	56	56	56	50	50	50	53
	CAIDA DE PRESIÓN -LADO TUBOS (PSI)	4	3	-1	8	6	0	10	-2	6	-7	-3	5	8	-4	2	3	2	2	2	8	7	7	4	8
	PSIG(IN)	N.D	N.D	N.D	N.D	ND	nd	N.D	N.D	ND	N.D	ND	ND	N.D	ND	ND	N.D	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	N.D
	PSIG(OUT)	N.D	N.D	N.D	N.D	ND	nd	N.D	N.D	ND	N.D	ND	N.D	ND	ND	ND	N.D	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	N.D
CAIDA DE PRESIÓN -LADO CASCO (PSI)	NO SE TIENE REGISTRO DE PRESIÓN, DEBIDO A QUE NO EXISTE LA FACILIDAD PARA ESTA MEDICIÓN EN EL EQUIPO																								

E755B.

																									
Área de tubo	565,4866776	in <sup>2</sup>																							
Número de tubos	172																								
ÁREA DE TRANSFERENCIA	666	Ft <sup>2</sup>																							
ÁREA DE TRANSFERENCIA	97263,70856	675,442421	Ft <sup>2</sup>																						
duty diseño (MBTU/h)	5,8																								
COEFICIENTE DE TRANSFER	87	BTU/Ft <sup>2</sup> /h*F																							
LADO TUBOS	UNID.	01/01/2016	02/01/2016	03/01/2016	04/01/2016	06/01/2016	07/01/2016			08/01/2016			09/01/2016			10/01/2016			11/01/2016			12/01/2016			
	°F (IN) (t1)	175,5	170,1	168,7	159,3	164,5	161	166	172,3	151	174	169,7	170	168	170,9	171	174	168,1	169	171	171,1	169	171	170	168
LADO CASCO	°F (OUT) (t2)	220,3	227,1	211,6	219,2	230	234	234,4	219	243	240,7	251	244	238,1	238	242	230,3	245	246	232,2	245	245	245	241	229,1
	°F (IN) (T1)	309,4	341,3	314,7	322,9	318	346	346,8	316	346	353,4	355	347	351,1	342	351	339,3	359	361	338,5	358	358	358	349	338,6
ESTIMACIÓN LMTD	°F (OUT) (T2)	242,4	253,3	238,8	245,4	245	267	259,1	232	273	267,4	258	264	264,1	264	277	253,6	276	274	254,2	275	275	276	270	258,1
	LMTD	77	98	86	95	84	109	102	77	112	103	96	98	104	98	107	94	111	110	94	108	109	109	104	99
ESTIMACIÓN DUTY	(t2-t1)	44,8	57,0	42,9	59,9	65,5	73,0	68,4	46,7	92,0	66,7	81,3	74,0	70,1	67,1	71,0	56,3	76,9	77,0	61,2	73,9	76,0	74,0	71,0	61,1
	(T1-t1)	133,9	171,2	146,0	163,6	153,5	185,0	180,8	143,7	195,0	179,4	185,3	177,0	183,1	171,1	180,0	165,3	190,9	192,0	167,5	186,9	189,0	187,0	179,0	170,6
	P=(t2-t1)/(T1-t1)	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,39	0,4	0,3	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
	(T1-T2)	67,0	88,0	75,9	77,5	73,0	79,0	87,7	84,0	73,0	86,0	97,0	83,0	87,0	78,0	74,0	85,7	83,0	87,0	84,3	83,0	83,0	82,0	79,0	80,5
	R=(T1-T2)/(t2-t1)	1,5	1,5	1,8	1,3	1,1	1,1	1,3	1,8	0,8	1,3	1,2	1,1	1,2	1,2	1,0	1,5	1,1	1,1	1,4	1,1	1,1	1,1	1,1	1,3
	FACTOR DE CORRECCIÓN LMTD	0,80	0,79	0,83	0,79	0,71	0,81	0,77	0,71	0,79	0,78	0,57	0,73	0,77	0,78	0,82	0,77	0,79	0,77	0,76	0,79	0,79	0,80	0,79	0,80
	LMTD CORREGIDO	62	77	71	75	60	88	78	54	88	80	54	72	80	77	89	72	88	85	72	86	86	87	82	80
	DUTY CALCULADO (MBTU/h)	3,6	4,5	4,1	4,3	3,5	5,1	4,5	3,2	5,1	4,6	3,2	4,2	4,7	4,5	5,1	4,2	5,1	4,9	4,2	5,0	5,0	5,0	4,8	4,6
	DESAPROVECHAMIENTO DE ENERGÍA TERMICA (%)	38,0	22,8	29,4	25,1	40,5	11,9	21,7	45,7	11,9	19,9	45,6	28,1	19,6	23,1	11,5	27,6	12,1	14,9	28,4	14,3	13,7	13,3	17,7	20,2
	EFICIENCIA TERMICA	(T1-T2)	67,0	88,0	75,9	77,5	73,0	79,0	87,7	84,0	73,0	86,0	97,0	83,0	87,0	78,0	74,0	85,7	83,0	87,0	84,3	83,0	83,0	82,0	79,0
(t2-t1)		44,8	57,0	42,9	59,9	65,5	73,0	68,4	46,7	92,0	66,7	81,3	74,0	70,1	67,1	71,0	56,3	76,9	77,0	61,2	73,9	76,0	74,0	71,0	61,1
ΔT min		44,8	57,0	42,9	59,9	65,5	73,0	68,4	46,7	73,0	66,7	81,3	74,0	70,1	67,1	71,0	56,3	76,9	77,0	61,2	73,9	76,0	74,0	71,0	61,1
ΔT máx = T1-t1		133,9	171,2	146,0	163,6	153,5	185,0	180,8	143,7	195,0	179,4	185,3	177,0	183,1	171,1	180,0	165,3	190,9	192,0	167,5	186,9	189,0	187,0	179,0	170,6
EFICIENCIA TERMICA INTERCAMBIADOR (ε)		0,33	0,33	0,29	0,37	0,43	0,39	0,38	0,32	0,37	0,37	0,44	0,42	0,38	0,39	0,39	0,34	0,40	0,40	0,37	0,40	0,40	0,40	0,40	0,36
ESTIMACIÓN DE LA CAIDA DE PRESIÓN LADO TUBOS Y CARCASA INTERCAMBIADOR	PSIG (IN)	60	55	55	60	55	53	54	48	48	48	55	60	60	54	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	PSIG (OUT)	55	54	58	54	52	52	46	46	45	54	59	56	52	58	56	58	57	58	57	58	57	57	58	54
	CAIDA DE PRESIÓN -LADO TUBOS (PSI)	5	1		6	3	1	8	2	3			4	8		4	2	3	2	3	2	3	3	2	6
	PSIG (IN)	N.D	N.D	N.D	N.D	ND	nd	N.D	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	N.D	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	N.D
	PSIG (OUT)	15	14	15	14	15	15	8	12	14	8	8	9	10	9	9	16	8	9	14	9	ND	ND	9	10
CAIDA DE PRESIÓN -LADO CASCO (PSI)		NO SE TIENE REGISTRO DE PRESIÓN , DEBIDO A QUE NO EXISTE LA FACILIDAD PARA ESTA MEDICIÓN EN EL EQUIPO																							



E757.


																										
Área de tubo	565,4866776	m <sup>2</sup>																								
Número de tubos	1236																									
ÁREA DE TRANSFERENCIA (a)	4777	ft <sup>2</sup>																								
duty diseño (MBTU/h)	13,5																									
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA (U)	63	BTU/ft <sup>2</sup> /h/°F																								
LADO TUBOS	UNID.	01/01/2016		02/01/2016		03/01/2016		04/01/2016		06/01/2016		07/01/2016		08/01/2016		09/01/2016		10/01/2016		11/01/2016		12/01/2016				
	°F (IN) (T1)	403,3	397,8	404,4	371,5	389,8	387	404	408,2	399	405	410,6	376	403	405,5	417	414	405,8	377	404	407,2	422	421	422	372	
°F (OUT) (T2)	361,8	387	341,4	351,3	370	383	383,9	368	393	388,1	406	389	384,1	401	394	382,2	406	381	384,2	410	410	410	411	394	388,3	
LADO CASCO	°F (IN) (t1)	308,9	334,8	303	307,4	335	335	336,1	331	323	349,3	347	336	340,2	348	334	334,5	349	337	340,1	351	376	351	343	326,2	
	°F (OUT) (t2)	360,7	376,8	340,3	352,1	378	381	382,4	335	384	381,3	367	375	382,4	376	379	377,6	379	382	378,7	373	355	355	377	380,4	
ESTIMACIÓN LMTD	(T1-T2)	43	21	64	19	12	6	22	73	15	24	44	1	21	30	38	36	27	-5	25	34	67	66	45	-8	
	(T2-t1)	53	52	38	44	35	48	48	37	70	39	59	53	44	53	60	48	57	44	44	59	34	60	51	62	
	(T1-t2)/(T2-t1)	1	0	2	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	2	1	0
	ln((T1-t2)/(T2-t1))	0	-1	1	-1	-1	-2	-1	1	-2	0	0	-4	-1	-1	0	0	-1	0	0	-1	-1	1	0	0	
	LMTD	48	34	50	30	21	20	33	53	36	31	51	13	31	40	48	42	40		34	45	49	63	48		
ESTIMACIÓN DUTY	(T2-T1)	-41,5	-10,8	-63,0	-20,2	-19,8	-4,0	-20,1	-40,2	-6,0	-16,9	-4,6	13,0	-18,9	-4,5	-23,0	-31,8	0,2	4,0	-19,8	2,8	-12,0	-10,0	-28,0	16,3	
	(t1-t1)	-94,4	-63,0	-101,4	-64,1	-54,8	-52,0	-67,9	-77,2	-76,0	-55,7	-63,6	-40,0	-62,8	-57,5	-83,0	-79,5	-56,8	-40,0	-63,9	-56,2	-46,0	-70,0	-79,0	-45,8	
	P=(T2-T1)/(t1-T1)	0,4	0,2	0,6	0,3	0,4	0,08	0,3	0,5	0,1	0,3	0,1	-0,3	0,3	0,1	0,3	0,4	0,0	-0,1	0,3	-0,05	0,3	0,1	0,4	-0,4	
	(t1-t2)	-51,8	-42,0	-37,3	-44,7	-43,0	-46,0	-46,3	-4,0	-61,0	-32,0	-20,0	-39,0	-42,2	-28,0	-45,0	-43,1	-30,0	-45,0	-38,6	-22,0	21,0	-4,0	-34,0	-54,2	
	R=(t1-t2)/(T2-T1)	1,2	3,9	0,6	2,2	2,2	11,5	2,3	0,1	10,2	1,9	4,3	-3,0	2,2	6,2	2,0	1,4	-150,0	-11,3	1,9	-7,9	-1,8	0,4	1,2	-3,3	
	FACTOR DE CORRECCIÓN (F) (LEÍDO EN GRAFICO)	0,88	0,85	0,84	0,88	N.A.	0,65	0,84	0,79	0,94	0,9	1	N.A.	0,88	1	0,88	0,84	N.A.	N.A.	0,85	N.A.	N.A.	1	1	0,88	N.A.
	LMTD CORREGIDO= FxLMTD	42	29	42	26		13	28	42	34	28	51		27	40	42	35		29				63	42		
	DUTY CALCULADO (MBTU/h)	12,6	8,8	12,7	7,9		4,0	8,3	12,6	10,1	8,3	15,3		8,2	12,1	12,8	10,6			8,7			18,9	12,7		
	DESAPROVECHAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA (%)	6,7	35,1	6,1	41,1		70,7	38,2	6,6	25,2	38,5		39,6	10,6	5,5	21,7			35,9						6,0	
	EFICIENCIA TÉRMICA	(T1-T2)	41,5	10,8	63,0	20,2	19,8	4,0	20,1	40,2	6,0	16,9	4,6	-13,0	18,9	4,5	23,0	31,8	-0,2	-4,0	19,8	-2,8	12,0	10,0	28,0	-16,3
(t2-t1)		51,8	42,0	37,3	44,7	43,0	46,0	46,3	4,0	61,0	32,0	20,0	39,0	42,2	28,0	45,0	43,1	30,0	45,0	38,6	22,0	-21,0	4,0	34,0	54,2	
ΔT min		41,5	10,8	37,3	20,2	19,8	4,0	20,1	4,0	6,0	16,9	4,6	-13,0	18,9	4,5	23,0	31,8	-0,2	-4,0	19,8	-2,8	-21,0	4,0	28,0	-16,3	
ΔT máx = T1-t1		94,4	63,0	101,4	64,1	54,8	52,0	67,9	77,2	76,0	55,7	63,6	40,0	62,8	57,5	83,0	79,5	56,8	40,0	63,9	56,2	46,0	70,0	79,0	45,8	
EFICIENCIA TÉRMICA INTERCAMBIADOR (ε)	0,44	0,17	0,37	0,32	0,36	0,08	0,30	0,05	0,08	0,30	0,07	-0,33	0,30	0,08	0,28	0,40	0,00	-0,10	0,31	-0,05	-0,46	0,06	0,35	-0,36		
ESTIMACIÓN DE LA CAIDA DE PRESIÓN LADO TUBOS Y CARCASA INTERCAMBIADOR	PSIG-(IN)	23	24	26	25,5	25	28	25	27	27	27	27	31	28	26	26	27	27	30	30	29	30	30	30	28	
	PSIG-(OUT)	19	20	19	19	20	20	19	20	20	20	24	21	20	22	21	20	22	21	22	22	22	22	22	20	
	CAIDA DE PRESIÓN - LADO TUBOS (PSI)	4	4	7	6,5	5	8	6	7	7	7	3	10	8	4	5	7	5	9	8	7	8	8	8	8	
	PSIG-(IN)	F/G	F/G	F/G	F/G	40	F/G	F/G	F/G	F/G	FG>30	FG>30	F/G	>30 FG	>30	F/G	>30 Fgama	>30	F/G	>30 F Gama	>30	>30 F Gama	>30FGama	F/G		
	PSIG-(OUT)	37,5	37	42	35	30	35	32	35	35	38	42,5	37	40	38	40	40	39	38	40	43	42	43	41	39	
CAIDA DE PRESIÓN - LADO CASCO (PSI)	NO SE PUEDE MEDIR, YA QUE ES NECESARIO PRESIONAR LA T753B EN ARAS DE EVITAR DISMINUCIÓN EN LA RECUPERACIÓN DEL NIVEL DE FENOL EN EL D751.																									







E755B.

																									
Área de tubo		565,4866776 in <sup>2</sup>																							
Número de tubos		172																							
ARÉA DE TRANSFERENCIA		666 Ft <sup>2</sup>																							
ARÉA DE TRANSFERENCIA		97263,70856 in <sup>2</sup> 675,442421 Ft <sup>2</sup>																							
duty diseño (MBTU/h)		5,8																							
COEFICIENTE DE TRANSFER		87 BTU/Ft <sup>2</sup> /h/°F																							
LADO TUBOS	UNID.	01/01/2016	02/01/2016	03/01/2016	04/01/2016	06/01/2016	07/01/2016		08/01/2016		09/01/2016		10/01/2016		11/01/2016		12/01/2016								
	°F (IN) (t1)	175,5	170,1	168,7	159,3	164,5	161	166	172,3	151	174	169,7	170	168	170,9	171	174	168,1	169	171	171,1	169	171	170	168
LADO CASCO	°F (OUT) (t2)	220,3	227,1	211,6	219,2	230	234	234,4	219	243	240,7	251	244	238,1	238	242	230,3	245	246	232,2	245	245	245	241	229,1
	°F (IN) (T1)	309,4	341,3	314,7	322,9	318	346	346,8	316	346	353,4	355	347	351,1	342	351	339,3	359	361	338,5	358	358	358	349	338,6
ESTIMACIÓN LMTO	°F (OUT) (T2)	242,4	253,3	238,8	245,4	245	267	259,1	232	273	267,4	258	264	264,1	264	277	253,6	276	274	254,2	275	275	276	270	258,1
	(T1-t2)	89	114	103	104	88	112	112	97	103	113	104	103	113	104	109	109	114	115	106	113	113	113	108	110
ESTIMACIÓN DUTY	(T1-t2)/(T2-t1)	67	83	70	86	81	106	93	60	122	93	88	94	96	93	106	80	108	105	83	104	106	105	100	90
	ln((T1-t2)/(T2-t1))	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	LMTO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	(t2-t1)	77	98	86	95	84	109	102	77	112	103	96	98	104	98	107	94	111	110	94	108	109	109	104	99
	(T1-t1)	44,8	57,0	42,9	59,9	65,5	73,0	68,4	46,7	92,0	66,7	81,3	74,0	70,1	67,1	71,0	56,3	76,9	77,0	61,2	73,9	76,0	74,0	71,0	61,1
P= (t2-t1)/(T1-t1)	133,9	171,2	146,0	163,6	153,5	185,0	180,8	143,7	195,0	179,4	185,3	177,0	183,1	171,1	180,0	165,3	190,9	192,0	167,5	186,9	189,0	187,0	179,0	170,6	
(T1-T2)	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,39	0,4	0,3	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
R= (T1-T2)/(t2-t1)	67,0	88,0	75,9	77,5	73,0	79,0	87,7	84,0	73,0	86,0	97,0	83,0	87,0	78,0	74,0	85,7	83,0	87,0	84,3	83,0	83,0	82,0	79,0	80,5	
FACTOR DE CORRECCIÓN LMTO	1,5	1,5	1,8	1,3	1,1	1,1	1,3	1,8	0,8	1,3	1,2	1,1	1,2	1,2	1,0	1,5	1,1	1,1	1,4	1,1	1,1	1,1	1,1	1,3	
LMTO CORREGIDO	0,80	0,79	0,83	0,79	0,71	0,81	0,77	0,71	0,79	0,78	0,57	0,73	0,77	0,78	0,82	0,77	0,79	0,77	0,76	0,79	0,79	0,80	0,79	0,80	
DUTY CALCULADO (MBTU/h)	62	77	71	75	60	88	78	54	88	80	54	72	80	77	89	72	88	85	72	86	86	87	82	80	
DESAPROVECHAMIENTO DE ENERGÍA TERMICA (%)	3,6	4,5	4,1	4,3	3,5	5,1	4,5	3,2	5,1	4,6	3,2	4,2	4,7	4,5	5,1	4,2	5,1	4,9	4,2	5,0	5,0	5,0	4,8	4,6	
(T1-T2)	38,0	22,8	29,4	25,1	40,5	11,9	21,7	45,7	11,9	19,9	45,6	28,1	19,6	23,1	11,5	27,6	12,1	14,9	28,4	14,3	13,7	13,3	17,7	20,2	
(t2-t1)	67,0	88,0	75,9	77,5	73,0	79,0	87,7	84,0	73,0	86,0	97,0	83,0	87,0	78,0	74,0	85,7	83,0	87,0	84,3	83,0	83,0	82,0	79,0	80,5	
ΔT min	44,8	57,0	42,9	59,9	65,5	73,0	68,4	46,7	92,0	66,7	81,3	74,0	70,1	67,1	71,0	56,3	76,9	77,0	61,2	73,9	76,0	74,0	71,0	61,1	
ΔT máx = T1-t1	133,9	171,2	146,0	163,6	153,5	185,0	180,8	143,7	195,0	179,4	185,3	177,0	183,1	171,1	180,0	165,3	190,9	192,0	167,5	186,9	189,0	187,0	179,0	170,6	
EFICIENCIA TERMICA INTERCAMBIADOR (ε)	0,33	0,33	0,29	0,37	0,43	0,39	0,38	0,32	0,37	0,37	0,44	0,42	0,38	0,39	0,39	0,34	0,40	0,40	0,37	0,40	0,40	0,40	0,40	0,36	
ESTIMACIÓN DE LA CAIDA DE PRESIÓN -LADO TUBOS Y CARCASA INTERCAMBIADOR	PSIG-(IN)	60	55	55	60	55	53	54	48	48	48	55	60	60	54	60	60	60	60	60	60	60	60	60	
	PSIG-(OUT)	55	54	58	54	52	52	46	46	45	54	59	56	52	58	56	58	57	58	57	57	57	57	54	
	CAIDA DE PRESIÓN -LADO TUBOS (PSI)	5	1		6	3	1	8	2	3			4	8		4	2	3	2	3	3	3	3	2	6
	PSIG(IN)	N.D	N.D	N.D	N.D	ND	nd	N.D	N.D	ND	ND	N.D	ND	ND	N.D	ND	N.D	ND	N.D	ND	ND	ND	ND	N.D	
PSIG(OUT)	15	14	15	14	15	15	8	12	14	8	8	9	10	9	9	16	8	9	14	9	ND	ND	9	10	
CAIDA DE PRESIÓN -LADO CASCO (PSI)	NO SE TIENE REGISTRO DE PRESIÓN , DEBIDO A QUE NO EXISTE LA FACILIDAD PARA ESTA MEDICIÓN EN EL EQUIPO																								



E757.

área de tubo		565,4866776 m <sup>2</sup>																							
Número de tubos		1236																							
ÁREA DE TRANSFERENCIA (a)		4777 Ft <sup>2</sup>																							
duty diseño (MBTU/h)		13,5																							
COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA (U)		63 BTU/(F <sup>2</sup> h)/F																							
LADO TUBOS	UNID.	01/01/2016	02/01/2016	03/01/2016	04/01/2016	05/01/2016	06/01/2016	07/01/2016	08/01/2016	09/01/2016	10/01/2016	11/01/2016	12/01/2016												
	T <sub>f</sub> (IN) (T1)	403,3	397,8	404,4	371,5	389,8	387	404	408,2	399	405	410,6	376	403	405,5	417	414	405,8	377	404	407,2	422	421	422	372
T <sub>f</sub> (OUT) (T2)	361,8	387	341,4	351,3	370	383	383,9	368	393	388,1	406	389	384,1	401	394	382,2	406	381	384,2	410	410	411	394	388,3	
LADO CASCO	T <sub>f</sub> (IN) (t1)	308,9	334,8	303	307,4	335	335	336,1	331	323	349,3	347	336	340,2	348	334	334,5	349	337	340,1	351	376	351	343	326,2
	T <sub>f</sub> (OUT) (t2)	360,7	376,8	340,3	352,1	378	381	382,4	335	384	381,3	367	375	382,4	376	379	377,6	379	384	378,7	373	355	355	377	380,4
ESTIMACIÓN LMTD	(T1-t2)	43	21	64	19	12	6	22	73	15	24	44	1	21	30	38	36	27	-5	25	34	67	66	45	-8
	(T2-t1)	53	52	38	44	35	48	48	37	70	39	59	53	44	53	60	48	57	44	44	59	34	60	51	62
	(T1-t2)/(T2-t1)	1	0	2	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	2	1	1	0
	ln((T1-t2)/(T2-t1))	0	-1	1	-1	-1	-2	-1	1	-2	0	0	-4	-1	-1	0	0	-1		-1	-1	1	0	0	
	LMTD	48	34	50	30	21	20	33	53	36	31	51	13	31	40	48	42	40		34	45	49	63	48	
ESTIMACIÓN DUTY	(T2-T1)	-41,5	-10,8	-63,0	-20,2	-19,8	-4,0	-20,1	-40,2	-6,0	-16,9	-4,6	13,0	-18,9	-4,5	-23,0	-31,8	0,2	4,0	-19,8	2,8	-12,0	-10,0	-28,0	16,3
	(t1-t1)	-94,4	-63,0	-101,4	-64,1	-54,8	-52,0	-67,9	-77,2	-76,0	-55,7	-63,6	-40,0	-62,8	-57,5	-83,0	-79,5	-56,8	-40,0	-63,9	-56,2	-46,0	-70,0	-79,0	-45,8
	P <sub>s</sub> =(T2-T1)/(t1-t1)	0,4	0,2	0,6	0,3	0,4	0,08	0,3	0,5	0,1	0,3	0,1	-0,3	0,3	0,1	0,3	0,4	0,0	-0,1	0,3	-0,05	0,3	0,1	0,4	-0,4
	(t1-t2)	-51,8	-42,0	-37,3	-44,7	-43,0	-46,0	-46,3	-4,0	-61,0	-32,0	-20,0	-39,0	-42,2	-28,0	-45,0	-43,1	-30,0	-45,0	-38,6	-22,0	21,0	-4,0	-34,0	-54,2
	R=(t1-t2)/(T2-T1)	1,2	3,9	0,6	2,2	2,2	11,5	2,3	0,1	10,2	1,9	4,3	-3,0	2,2	6,2	2,0	1,4	-150,0	-11,3	1,9	-7,9	-1,8	0,4	1,2	-3,3
	FACTOR DE CORRECCIÓN (F) (LEÍDO EN GRAFICO)	0,88	0,85	0,84	0,88	N.A.	0,65	0,84	0,79	0,94	0,9	1	N.A.	0,88	1	0,88	0,84	N.A.	N.A.	0,85	N.A.	N.A.	1	0,88	N.A.
	LMTD CORREGIDO= FxLMTD	42	29	42	26		13	28	42	34	28	51		27	40	42	35			29			63	42	
	DUTY CALCULADO (MBTU/h)	12,6	8,8	12,7	7,9		4,0	8,3	12,6	10,1	8,3	15,3		8,2	12,1	12,8	10,6			8,7			18,9	12,7	
	DESAPROVECHAMIENTO DE ENERGÍA TÉRMICA (%)	6,7	35,1	6,1	41,1		70,7	38,2	6,6	25,2	38,5			39,6	10,6	5,5	21,7			35,9					6,0
	EFICIENCIA TÉRMICA	(T1-T2)	41,5	10,8	63,0	20,2	19,8	4,0	20,1	40,2	6,0	16,9	4,6	-13,0	18,9	4,5	23,0	31,8	-0,2	-4,0	19,8	-2,8	12,0	10,0	28,0
(t2-t1)		51,8	42,0	37,3	44,7	43,0	46,0	46,3	4,0	61,0	32,0	20,0	39,0	44,2	28,0	45,0	43,1	30,0	45,0	38,6	22,0	-21,0	4,0	34,0	54,2
ΔT min		41,5	10,8	37,3	20,2	19,8	4,0	20,1	4,0	6,0	16,9	4,6	-13,0	18,9	4,5	23,0	31,8	-0,2	-4,0	19,8	-2,8	-21,0	4,0	28,0	-16,3
ΔT máx = T1-t1		94,4	63,0	101,4	64,1	54,8	52,0	67,9	77,2	76,0	55,7	63,6	40,0	62,8	57,5	83,0	79,5	56,8	40,0	63,9	56,2	46,0	70,0	79,0	45,8
EFICIENCIA TÉRMICA INTERCAMBIADOR (ε)		0,44	0,17	0,37	0,32	0,36	0,08	0,30	0,05	0,08	0,30	0,07	-0,33	0,30	0,08	0,28	0,40	0,00	-0,10	0,31	-0,05	-0,46	0,06	0,35	-0,36
ESTIMACIÓN DE LA CAIDA DE PRESIÓN LADO TUBOS Y CARCASA INTERCAMBIADOR	PSIG-(IN)	23	24	26	25,5	25	28	25	27	27	27	27	31	28	26	26	27	27	30	30	29	30	30	30	28
	PSIG-(OUT)	19	20	19	19	20	20	19	20	20	20	24	21	20	22	21	20	22	21	22	22	22	22	22	20
	CAÍDA DE PRESIÓN -LADO TUBOS (PSI)	4	4	7	6,5	5	8	6	7	7	7	3	10	8	4	5	7	5	9	8	7	8	8	8	8
	PSIG(IN)	f16	f16	f16	f16	40	f16	f16	f16	f6	f16	FG>30	FG>30	f16	>30 FG	>30	f16	>30 fgama	>30	f16	>30 F Gama	>30	>30 F Gama	>30FGama	f16
	PSIG(OUT)	37,5	37	42	35	30	35	32	35	35	38	42,5	37	40	38	40	40	39	38	40	43	42	43	41	39
	CAÍDA DE PRESIÓN -LADO CASCO (PSI)	NO SE PUEDE MEDIR, YA QUE ES NECESARIO PRESIONAR LA T753B EN ARAS DE EVITAR DISMINUCIÓN EN LA RECUPERACIÓN DEL NIVEL DE FENOL EN EL D751.																							







**ANEXO G. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN RESUMEN DEL BALANCE DE  
CORRIENTES PRODUCTO DE LA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE  
OBTENCIÓN DE LA BASES LUBRICANTE.**

El proceso de comparación de los datos históricos de planta contra la recopilación de datos de la simulación por análisis de sensibilidad mediante el análisis Anova de comparación de dos muestras independientes, arrojó que la simulación representa el proceso real con un intervalo de confianza del 95%, pues que se acepta la hipótesis nula que dos muestras son iguales para un valor de probabilidad mayor a 0,05.

A continuación, se muestra la tabla 1, de análisis de varianza donde se comparan la media de los puntos iniciales de ebullición del desparafinado medio del proceso real y simulado, de la misma forma se hizo para la desviación estándar de las mismas. Donde se muestra que se acepta la hipótesis nula.

**Tabla 1.** Comparación de punto inicial de ebullición del desparafinado medio.

	<i><b>Proceso Real</b></i>	<i><b>Proceso simulado</b></i>
Media, °F	633,68	649,12
Desviación estándar, °F	19,6	5,16
Grados de libertad	38	17
F	20,51	
Valor P (F<0,05)	0,111	

Para asegurar la validez de la simulación se aplicó el mismo procedimiento para las corridas real y simulada con desparafinado liviano, observando el comportamiento que para el liviano el punto inicial de ebullición es menor y que al comparar con el proceso simulado se encontró que las medias y la desviación estándar, presenta una similitud bajo un intervalo de confianza del 95%, puesto que el valor de probabilidad es mayor a 0,05, lo cual significa que se acepta la hipótesis nula que las medias y las desviaciones estándar son similares.

**Tabla 2.** Comparación de punto inicial de ebullición del desparafinado liviano.

	<i>Proceso Real</i>	<i>Proceso simulado</i>
Media, °F	594,146	608,734522
Desviación, °F	21,08	8,07324145
Observaciones	30	27
Grados de libertad	29	26
F	55,08196	
P(F<=f) una cola	0,903	

Tal como se hizo para los casos anteriores, se hizo para el resto de la simulación encontrando, que, por cada unidad de proceso, se presenta similitud en variables resultantes o dependientes, dichas variables seleccionadas como parámetros críticos de calidad como puntos iniciales de ebullición de las bases lubricantes, viscosidad, entre otros. Todos estos resultados se pueden detallar en los anexos XX.

## **ANÁLISIS DE VARIABILIDAD**

De acuerdo al comportamiento real del proceso y el análisis de variabilidad generado de factores claves de proceso, como perfil de destilación del destilado liviano y destilado medio, flujo de solvente durante la extracción, temperatura y flujo de hidrogeno al hidrotratamiento, sobre las variables resultantes o parámetros claves de calidad de las bases lubricantes como son viscosidad, índice de viscosidad y punto inicial de ebullición, se encontró que mantener una mezcla de crudo cusiana, cupiagua y HCT con una fracción de crudo cupiagua entre 0,45 y 0,55 (Cusiana 0,28, HCT 0,1 y Caño limón entre 0,09 y 0,1) con un reflujo medio entre 39000 y 40000 barriles por día (BPD) se logra asegurar la calidad del destilado medio y liviano, que al final se traduce en un desparafinado medio con un punto inicial de ebullición entre 635 a 649 °F y el desparafinado liviano entre 608 y 617 °F.

A continuación, se muestra en las tablas 3 y 4, el análisis de regresión múltiple con su respectivo Anova, realizado sobre el análisis de sensibilidad de la simulación, obteniendo que las variables de reflujo medio de la torre de destilación al vacío, la variación de la composición de la carga de crudo y la temperatura de destilación de recobro de desparafinado definen el comportamiento de parámetros de calidad como punto inicial de ebullición del desparafinado medio y liviano bajo un intervalo de confianza del 95%, puesto que los valores de probabilidad de cada parámetro y el valor de la aceptación de la regresión dieron por debajo de 0,05, lo cual rechaza la hipótesis nula, aceptando que las variables dependientes antes mencionadas tienen relación estadística significativa y que la ecuación de la regresión es válida, además que el coeficiente de correlación indica que las variables independientes explican un 99,9% el comportamiento de la variable resultante.

Tabla 3. Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación múltiple	0,999999969
Coeficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,999999937
R <sup>2</sup> ajustado	0,999999929

Tabla 4. Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	87,63782465	43,81891233	119105251,1	9,85093E-55
Residuos	15	5,51851E-06	3,67901E-07		
Total	17	87,63783017			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción (Temp. Max. IBP)	678,3718	0,0140	48602,4379	0,0000	678,3420	678,401525
Fracción de crudo Cupiagua	-58,8405	0,0038	-15434,0142	0,0000	-58,8487	-58,8324231
Reflujo medio de torre de vacío[BPD]	0,0000	0,0000	-41,3363	0,0000	0,0000	-1,3729E-05

Al detallar la ecuación 1, se puede definir que el máximo valor de punto inicial de ebullición debe ser de 678 °F, el cual es representado por el intercepto y que aumentar el contenido de crudo cupiagua en la mezcla genera una disminución lo cual favorece un menor punto inicial de ebullición y en su defecto viscosidad dentro de la calidad determinada para un mayor rendimiento de bases lubricantes. También se puede resaltar que el incremento del reflujo medio contribuye a disminuir el punto de ebullición, es decir, que aumentar el reflujo se hacer mayor diferencia de volatilidad entre productos ligeros y medios, lo cual posiblemente significa que más cantidad de fracciones medias desciende hacia la parte inferior de la torre.

$$\text{Temp. IBP}_{ADP} = 678,37 - 58,84 \cdot FCUP - 0,0000145 \cdot RMTV \quad \text{Ecuación (1)}$$

**Temp. IBP<sub>ADPm</sub>**: Temperatura inicial de ebullición del desparafinado medio

**FCUP**: Fracción de crudo cupiagua

**RMTV**: Reflujo medio de la torre al vacío

RESUMEN BALANCE DE CORRIENTES RESULTADO SIMULACION PROCESO DE DESTILACION Y OBTENCION DE LA BASE LUBRICANTE												
					DESTILADO LIVIANO				DESTILADO MEDIO			
	Unit	CRUDOPARA	Atm Residue	Vacumm Residue	DL	ADP	Rafinado Liviano	BL40	DM	ADP	Rafinado Medio	BL40
Fraccion de vapor		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Temperatura	F	90	537	543	455	176	254	104	502	227	278	119
Presion	psig	130	19	-13	-13	12	28	42	-13	12	28	42
Flujo molar	MMSCFD	22	6	2	2	1	1	1	2	1	1	1
Flujo masico	lb/hr	430868	210872	113170	53832	25538	24070	24107	58769	25477	24126	23827
Flujo Volumetrico	barrel/day	36000	16170	8400	4233	1995	1880	1769	4599	1995	1889	1857
Energia	Btu/hr	-389515940	-139260215	-73990088	-38309486	-22279235	-19965572	-9995494	-39956523	-21558836	-19677065	-14855824

## ANEXO H. RECOMENDACIÓN PARA LA INYECCIÓN DE ADITIVO



Product	Type
LUBRIZOL® 5810	Turbine Oil Additive

**Mainline turbine oil additive system designed for steam and medium duty gas turbines**

### Application

Recommended for use at: 0.7 % by weight  
 In Group I base stocks to meet or exceed the many requirements for premium turbine oils particularly high temperature gas turbine applications requiring:

- ASTM D-4304 TYPE I
- ALSTOM HTGD 90117
- ASTM D-4303 TYPE III
- BRITISH STANDARD BS 489
- DIN 51515 PART 1
- DIN 51515 PART 2
- DIN 51524 PART 1
- GENERAL ELECTRIC GEK-32568F
- ISO 8068 TGB TGSB
- ISO 11158 HH
- ISO 11158 HL
- SIEMENS AG TLV 9013 05 HIGH THERMAL STABILITY
- SIEMENS AG TLV 9013 04 STANDARD THERMAL STABILITY

### Benefits:

LUBRIZOL® 5810 may be used to formulate R&O turbine oils using Group I base stocks that meet the enhanced oxidation and filterability requirements of modern turbine oil specifications.

LUBRIZOL® 5810 can be boosted with LUBRIZOL® 5101A to provide mild antiwear properties for oils used in lubricating geared turbines.

### Physical Characteristics

	Minimum	Target	Maximum
FLASH POINT, C, PMCC		145	
LBS PER U.S. GAL @ 15.6 C		7.93	
LBS PER IMP GAL @ 15.6 C		9.52	
POUR POINT, C		-24	
SPECIFIC GRAVITY @ 15.6 C	0.926	0.946	0.966
VISCOSITY @ 100 C, CST		9	
VISCOSITY @ 40 C, CST		135	

### Chemical Characteristics

	Minimum % Weight	Typical	Maximum % Weight
NITROGEN	4.20	4.70	5.20
SULFATED ASH		0.00	



## PETROLAD 9533

### Hydraulic additive package

Issue date: 18-10-2012

#### Description

PETROLAD 9533 is a zinc based anti-wear, corrosion inhibitor and anti-oxidant for production of hydraulic fluids.

#### Application

PETROLAD 9533 is especially designed to formulate zinc containing hydraulic fluids, based on mineral oils as well PAO/ester based.

#### Features

Performances of PETROLAD 9533 at 0,6 to 0,8 wt. %:

- Cincinatti Milacron P-68/ 69 / 70
- Denison HF-0 / HF-1 / HF-2
- Denison T-6H20C Hybrid Pump (A-TP-30533) pass for Denison HF-0 at 0.8%
- DIN 51524 part 2 and 3
- US Steel 127 / 136
- Vickers M-2950-S / I-286-S

For specific, custom made recommendations please contact your BRB representative.

#### Benefits

PETROLAD 9533 offers outstanding corrosion protection, good filterability, demulsification, very high oxidation stability and retention of performance that extends fluid and equipment life.

#### Typical Data

Parameter	Unit	Value
Appearance		Clear, light brown
Density at 20 °C	Kg/l	0.998
Flashpoint	°C	150
Viscosity at 40 °C	cSt	68

Page 1

BRB International BV, PO Box 3552, NL-6017 ZH Thorn, Office: Branskamp 12, NL-6014 CB IJtervoort, The Netherlands  
T +31 (0)475 56 03 00, F +31 (0)475 56 61 44, additives@brbbv.com www.brb-international.com

## ANEXO I: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LABORATORIO DE LUBRICANTE ISO68 PREPARADO POR EL LABORATORIO INDUSTRIAL DE LA GRB.



<b>Reporte Nro:</b> 30318		<b>Fecha:</b> 23/09/2014		
<b>Código:</b> 390		<b>Muestra</b>		
<b>Nombre:</b> MASERPET LTDA		<b>Muestra Lab No:</b> 79550		
<b>Vendedor:</b> Luis J. Rueda R.		<b>Fecha toma de muestra:</b> 12/08/2014		
		<b>Fecha de recepción:</b> 08/09/2014		
		<b>Muestra Cliente Nro:</b> 2		
<b>Código:</b> 1		<b>Periodo de servicio:</b> NR		
<b>Nombre:</b> MASERPET LTDA		<b>Unidad:</b> NR		
<b>Ciudad:</b> Barrancabermeja				
<b>Dirección:</b> CR 8 No 49 - 19 Of 808				
<b>Contacto:</b> Luis J. Rueda R.				
<b>Teléfono:</b> 300 313 66 06				
<b>Email:</b> luis.rueda@maserpet.net				
<b>Equipo:</b>		<b>Producto:</b>		
<b>Código:</b> NO REPORTA		<b>Código:</b> Base Lubricante		
<b>Clase:</b> NR		<b>Nombre:</b> Producto a base de Base Parafínica.		
<b>Marca:</b> NR		<b>Grado:</b> ISO 68		
<b>Modelo:</b> NR				
<b>Parte:</b> NR				
ANÁLISIS	METODO	UNIDADES	RESULTADO	COMENTARIO
Apariencia	MI-001	N.A.	Clara Brillante	REPORTAR
Olor	MI-001	N.A.	Característico	REPORTAR
Color	MI-001	N.A.	Ambar	REPORTAR
Viscosidad Cinemática a 40C	ASTM D-445	cSt	65,76	Entre 61,2 a 74,8
Viscosidad Cinemática a 100C	ASTM D-445	cSt	8,579	REPORTAR
Índice de Viscosidad	ASTM D-2270	N.A.	101	Mínimo 90
Punto de Inflamación	ASTM D-92	°C	236,5	Mínimo 195
Punto de Fluidez	ASTM D-97	°C	-27	Máximo -12
Corrosión a la lamina de cobre	ASTM D-130	Segun Tabla	1a	Máximo 2
Espumas Secuencia I (0.0 min)	ASTM D-892	ml	0	Máximo 150
Espumas Secuencia I (10 min)	ASTM D-892	ml	0	Máximo 0
Espumas Secuencia II (0.0 min)	ASTM D-892	ml	0	Máximo 75
Espumas Secuencia II (10 min)	ASTM D-892	ml	0	Máximo 0
Espumas Secuencia III (0.0 min)	ASTM D-892	ml	0	Máximo 150
Espumas Secuencia III (10 min)	ASTM D-892	ml	0	Máximo 0
Contenido de agua	ASTM D-95	%	0	Libre de Agua
TAN	ASTM D-974	mg KOH/g	0,11	REPORTAR
Separación del agua	ASTM D-1401	ml-ml-ml min	40-40-0-10	Máximo 30
<b>COMENTARIOS:</b>				
<p>1. La apariencia, Color y olor de la muestra analizada son típicos para este tipo de muestras sin uso.</p> <p>2. Los análisis requeridos de viscosidad a 40°C, índice de viscosidad, Corrosión a la Lamina de Cobre, Punto de Fluidez, Espumas, Punto de Inflamación, Contenido de Agua y Separación del Agua se encuentran dentro de lo especificado por la norma NTC 3382.</p> <p>3. El valor del Numero acido TAN se encuentra dentro de valores típicos para esta clase de muestras sin uso.</p> <p>4. Los resultados obtenidos corresponden estrictamente a la muestra analizada y no a otra de similar procedencia.</p>				
<b>DIAGNOSTICO:</b>				
De acuerdo a los análisis realizados, el producto cumple con las especificaciones establecidas en la norma NTC 3382 "Aceites para uso hidráulico".				
<b>Convenciones:</b>		0: no detectado - N.A: no aplica - N.R.: no reportado		
Valor del parámetro dentro de límites normales		Normal	Responsable del Análisis:	
Valor alto del parámetro		Alerta	Nombre: Ing. Manuel Mora Ortiz T.P. 14389	
Valor del parámetro anormal		Crítico	Email: manuelmora@cyat.com.co	

## ANEXO J: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LABORATORIO DE LUBRICANTE ISO68 COMPRADO POR ECOPETROL.



<b>Reporte Nro:</b> 30299		<b>Fecha:</b> 18/09/2014	
<b>Código:</b> 390	<b>Nombre:</b> MASERPET LTDA	<b>Muestra Lab No:</b> 79549	<b>Fecha toma de muestra:</b> 07/08/2014
<b>Vendedor:</b> Luis J. Rueda R.		<b>Fecha de recepción:</b> 08/09/2014	<b>Muestra Cliente Nro:</b> 1
<b>Código:</b> 1	<b>Nombre:</b> MASERPET LTDA	<b>Período de servicio:</b>	<b>Unidad:</b> NR
<b>Ciudad:</b> Barrancabermeja	<b>Dirección:</b> CR 8 No 49 - 19 Of 808		
<b>Contacto:</b> Luis J. Rueda R.	<b>Teléfono:</b> 300 313 66 06		
<b>Email:</b> luis.rueda@maserpet.net			
<b>Equipo:</b>		<b>Producto:</b>	
<b>Código:</b> NO REPORTA	<b>Clase:</b> NR	<b>Código:</b>	Base Lubricante
<b>Marca:</b> NR	<b>Modelo:</b> NR	<b>Nombre:</b>	Producto a base de Base Parafínica.
<b>Parte:</b> NR		<b>Grado:</b>	ISO 68

ANÁLISIS	METODO	UNIDADES	RESULTADO	COMENTARIO
Apariencia	MI-001	N.A.	CLARA BRILLANTE	REPORTAR
Olor	MI-001	N.A.	Característico	REPORTAR
Viscosidad Cinemática a 100C	ASTM D-445	cSt	8,651	REPORTAR
Viscosidad Cinemática a 40C	ASTM D-445	cSt	67,48	Entre 61.2 a 74.8
Índice de Viscosidad	ASTM D-2270	N.A.	99	Mínimo 90
Punto de Inflamación	ASTM D-92	°C	228,5	Mínimo 195
Punto de Fluidez	ASTM D-97	°C	-18	Máximo -12
Corrosión a la lamina de cobre	ASTM D-130	Según Tabla	1a	Máximo 2
Espumas Secuencia I (0.0 min)	ASTM D-892	ml	10	Máximo 150
Espumas Secuencia I (10 min)	ASTM D-892	ml	0	Máximo 0
Espumas Secuencia II (0.0 min)	ASTM D-892	ml	0	Máximo 75
Espumas Secuencia II (10 min)	ASTM D-892	ml	0	Máximo 0
Espumas Secuencia III (0.0 min)	ASTM D-892	ml	10	Máximo 150
Espumas Secuencia III (10 min)	ASTM D-892	ml	0	Máximo 0
Contenido de agua	ASTM D-95	%	0	Libre de Agua
TAN	ASTM D-974	mg KOH/g	0,44	REPORTAR
Separación del agua	ASTM D-1401	ml-ml-ml min	40-40-0-5	Máx. 30 min.

**COMENTARIOS:**

- La apariencia y olor de la muestra analizada son los típicos para este tipo de muestras sin uso.
- Los análisis requeridos de viscosidad a 40°C, índice de viscosidad, Corrosión a la Lamina de Cobre, Punto de Fluidez, Espumas, Punto de Inflamación, Contenido de Agua y Separación del Agua se encuentran dentro de lo especificado por la norma NTC 3382.
- El valor del Numero acido TAN se encuentra dentro de valores típicos para esta clase de muestras sin uso.
- Los resultados obtenidos corresponden estrictamente a la muestra analizada y no a otra de similar procedencia.

**DIAGNÓSTICO:**  
De acuerdo a los análisis realizados, el producto cumple con las especificaciones establecidas en la norma NTC 3382 "Aceites para uso hidráulico".

<b>Convenciones:</b>	0: no detectado - N.A: no aplica - N.R.: no reportado
Valor del parámetro dentro de límites normales	Normal
Valor alto del parámetro	Alerta
Valor del parámetro anormal	Crítico

Responsable del Análisis:  
Nombre: Ing. Manuel Mora Ortiz T.P. 14309  
Email: manuelmora@cyat.com.co

# ANEXO K BOMBA DE INYECCIÓN DE ADITIVO.

Optimo rendimiento en la dosificación - Internet Explorer

https://outlook.office.com/owa/?viewmodel=PassMessageItem&itemID=AAAB402NNTJOWESWRZmIjNDkRjZDhVTHlNFjMGMzMyYyZGQ5AA4AAACidrfyQ7N6suVnBBw4yUjH3FSTTQ7S21%2BXYTgg4AA4Chz344yUjH3FSTTQ7S21%2BXYTgg4AD5wW64AA%3D&wid=H8isppopd=1&path=

Reponer a todos | Eliminar | Mover a la bandeja de entrada | Conexión no deseada | ...

Optimo rendimiento en la dosificación

Novatec Fluid System S.A.  
jue 10/08/2017, 16:02  
Henry Germán Lázaro

Cancelar suscripción

[Ver este aviso en la web](#) | [Reenviar este mensaje](#)

## Un optimo rendimiento, inicia con una correcta instalación...

**Dosiport.** Cuenta con los componentes necesarios para la fácil instalación y segura operación de una bomba dosificadora, garantizando así la continua, precisa y controlada inyección de los productos químicos, optimizando su consumo.



- 1. Estructura metálica**  
Para el mejor posicionamiento de la bomba dosificadora
- 2. Línea de succión**  
Para conectar el lado de succión de una bomba dosificadora al medio que será suministrado
- 3. Filtro tipo "T" con carga**  
Para evitar el ingreso de sólidos a las válvulas y cabezal de dosificación, lo cual evita taponamiento y presión de descarga del sistema alarga la vida útil de la bomba dosificadora
- 4. Cilindro de alabro**  
Para la medición del flujo de la bomba dosificadora
- 5. Arrancador eléctrico NEMA IP65**  
Para una fácil conexión y operación ON-OFF del sistema dosificadora al medio que será suministrado

\* Manómetro (Opcional)  
Para monitorear de manera fácil y permanente la presión de descarga del sistema

10:43 10/08/2017

## ANEXO L. LINEA DE ENVASADO.

Para ejecutar el empaqueo de los lubricantes, se requiere la adquisición de una envasadora dual para tambores de 55 galones y contenedores de 275 galones con su respectiva bascula para el pesaje del producto (Turbina 32/ Turbina 68)

