

APROVECHAMIENTO DE NAFTA CRAQUEADA UTILIZANDO LA CAPACIDAD
INSTALADA DE LA T-4565 EN LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN DE LA REFINERÍA
DE BARRANCABERMEJA

JHON FREDY CERTUCHE VÁSQUEZ

Ing. de Producción



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRIA EN INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2016

APROVECHAMIENTO DE NAFTA CRAQUEADA UTILIZANDO LA CAPACIDAD INSTALADA DE LA T-4565 EN LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA

APROVECHAMIENTO DE NAFTA CRAQUEADA UTILIZANDO LA CAPACIDAD
INSTALADA DE LA T-4565 EN LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN DE LA REFINERÍA
DE BARRANCABERMEJA

JHON FREDY CERTUCHE VÁSQUEZ

Ing. de Producción

Trabajo de Grado para optar al título de Magister en Ingeniería Química

Directora

DEBORA ALCIDA NABARLATZ

Ingeniera Química, Ph.D



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRIA EN INGENIERIA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

Este libro está dedicado a Dios por sobre todas las cosas, te lo dedico por otorgarme la posibilidad de existir y vivenciar tus grandes maravillas al lado de mis seres queridos y por brindarme tu inmenso amor.

A todas aquellas personas que aportaron en mí su granito de arena para enriquecer mi aprendizaje día a día, a mis padres; mi señora madre que luchó con entereza por sacar adelante sus hijos a pesar de las dificultades, a mi padre quien fundamentó los valores que en mí están forjados y que hoy son el reflejo de su existencia, a mis adoradas tías, que con su paciencia y sapiencia me enseñaron con espíritu y pasión las fuertes bases en las que he construido paso a paso mi éxito, a mis hermanos, quienes hoy por hoy continúan trabajando por mejorar cada día y que sigan los buenos ejemplos, a toda mi familia quienes me apoyaron y comprendieron mi ausencia durante este largo camino y a todos aquellos seres queridos, que aunque no están presentes físicamente, los llevo en mi corazón eternamente.

A mis hijos, que se esfuerzan para sacar adelante sus estudios y a mi esposa quien me acompañó en este difícil camino.

A todas las personas de buen corazón y de espíritu loable que cada día se esfuerzan y se levantan con la FE y la Esperanza de encontrar en Dios su salvación y apoyan a esos que no tienen, para que sean también instrumentos de PAZ y no desfallezcan ante los obstáculos que son la prueba de que si eres quien puede superarlos.

AGRADECIMIENTOS

Faltarían palabras para expresar este profundo agradecimiento ante todo con Dios por darme su inmenso amor y voluntad para permitirme ser quien soy, con todas mis virtudes e imperfecciones, muchas gracias papito Dios.

Agradezco al Gerente General de la Refinería de Barrancabermeja, Dr. Orlando Díaz Montoya, quien ha demostrado su liderazgo integral en el desarrollo de su talento humano y de esta gran empresa como lo es Ecopetrol. Siempre le estaré agradecido.

Al Ph.D Nelson Fernando Angulo Pedroso, por haber depositado su confianza y liderazgo en mí para el cumplimiento de este gran reto hasta la culminación del mismo y por estar ahí en los momentos claves. Muchas gracias Ing. Nelson.

A mi directora de proyecto Ph.D Debora Alcida Nabarlatz quien fue mi guía durante todo este proceso y realmente personalizó su rol engrandeciéndome con sus conocimientos y calidad humana cada día. Con devoción y respeto, muchas gracias profesora.

A los Ingenieros Oswaldo Andrés Muñoz Espinoza y Carlos Alberto Meza Méndez, por su apoyo en mi carrera profesional, muchas gracias.

A los Ingenieros Cristian Santamaría y Yesid Sánchez por su apoyo decidido, colaboración y acompañamiento en el desarrollo de la Tesis, muchas gracias.

Al personal del laboratorio de la Refinería de Barrancabermeja, especialmente al Ing. Albeiro Alarcón Valenzuela por los análisis realizados necesarios para lograr los objetivos propuestos. Muchas gracias.

A todo el personal que directa o indirectamente hicieron parte de la realización de este gran sueño y regalo de Dios, muchas Bendiciones y Muchas Gracias.

CONTENIDO

| | pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN | 20 |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 23 |
| 2 OBJETIVOS | 27 |
| 2.1 OBJETIVO GENERAL | 27 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 27 |
| 3. MARCO TEÓRICO | 28 |
| 3.1 COMPOSICIÓN DEL PETRÓLEO | 28 |
| 3.1.1. Parafínicos | 28 |
| 3.1.2. Ciclo parafinas o naftenos | 29 |
| 3.1.3 Aromáticos | 29 |
| 3.1.4 Olefinas | 30 |
| 3.1.5 Azufre | 31 |
| 3.2 PROCESOS DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO | 31 |
| 3.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA ... | 34 |
| 3.3.1 Descripción general de la unidad de Alquilación | 36 |
| 3.3.2 Sistema de rectificación de alquilato | 37 |
| 3.4 GASOLINAS DE AVIACIÓN | 39 |
| 3.4.1 Alquilato de aviación o Avgas (100-130) | 40 |
| 3.4.2 Nafta craqueada | 42 |
| 3.4.3 Riesgos en aviones a pistón | 42 |

| | |
|--|----|
| 3.5 MEZCLA DE AVGAS CON GASOLINA AUTOMOTRIZ | 44 |
| 3.6 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN | 44 |
| 3.6.1 Destilación atmosférica | 45 |
| 3.6.2 Presión de Vapor Reid (RVP) | 45 |
| 3.6.3 Índice de bloqueo de vapor (IBV)..... | 46 |
| 3.6.4 Octanaje..... | 47 |
| 3.6.5 Contenido de azufre..... | 48 |
| 3.6.6 Contenido de gomas | 48 |
| 3.7 COMPUESTOS ANTIDETONANTES EN LA GASOLINA | 48 |
| 3.7.1 Tetraetilo de plomo (TEL) | 49 |
| 3.7.2 Metil ciclopentadienil tricarbonil manganeso (MMT) | 49 |
| 3.7.3 Metil terbutil éter (MTBE) | 50 |
| 3.8 SIMULACIÓN DE PROCESOS | 50 |
| 4. METODOLOGÍA | 52 |
| 4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 52 |
| 4.2 RECOPIACIÓN DE DATOS..... | 53 |
| 4.2.1 Datos de la nafta craqueada | 53 |
| 4.2.2 Datos del alquilato | 54 |
| 4.2.3 Parámetros de diseño y operación de la torre rectificadora de alquilato (T-4565) | 55 |
| 4.2.4 Datos para cálculos económicos | 56 |
| 4.3 SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS EN OPERACIÓN HABITUAL DE LA UNIDAD..... | 57 |
| 4.3.1 Montaje de la simulación en el software Aspen Hysys | 57 |
| 4.3.2 Validación de los datos obtenidos mediante la simulación | 58 |

| | |
|--|----|
| 4.3.3 Cálculo del RON y del MON | 59 |
| 4.4 INCORPORACIÓN DE LA CORRIENTE DE NAFTA CRAQUEADA A LA TORRE T-4565 DE ACUERDO A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA REGLA DE MEZCLA ALQUILATO-NAFTA | 60 |
| 4.4.1 Simulación incorporando nafta craqueada..... | 60 |
| 4.4.2 Determinación de propiedades de las mezclas..... | 62 |
| 4.4.3 Determinación teórica de la adición de Tetraetilo de plomo..... | 62 |
| 4.5 INCORPORACIÓN DE LA CORRIENTE DE NAFTA CRAQUEADA EN EL CASO BASE Y VERIFICACIÓN DE LAS CORRIENTES DE SALIDA..... | 63 |
| 4.6 ANÁLISIS ECONÓMICO | 64 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 66 |
| 5.1 RECOPIACIÓN DE DATOS..... | 66 |
| 5.1.1 Datos del alquilato | 66 |
| 5.1.2 Datos de operación de la torre rectificadora de alquilato (T-4565) | 67 |
| 5.1.3 Datos de la nafta craqueada | 67 |
| 5.1.4 Composición del alquilato total y el alquilato liviano | 68 |
| 5.2 SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS EN OPERACIÓN HABITUAL DE LA UNIDAD..... | 71 |
| 5.3 INCORPORACIÓN DE LA CORRIENTE DE NAFTA CRAQUEADA A LA T-4565 Y DETERMINACIÓN DE LA REGLA DE MEZCLA ALQUILATO-NAFTA..... | 75 |
| 5.3.1 Simulación incorporando nafta craqueada..... | 75 |
| 5.3.2 Contenido de azufre..... | 80 |
| 5.3.3 Composición de la corriente de alimentación de acuerdo al PIANO | 81 |
| 5.3.4 Adición de tetraetilo de plomo (TEL) | 83 |
| 5.3.5 Índice de bloqueo de vapor (IBV)..... | 86 |

| | |
|--|-----|
| 5.3.6 Producto pesado de la destilación de la mezcla de alquilato total con nafta craqueada | 86 |
| 5.3.7 Viabilidad de las mezclas de alquilato total y nafta craqueada | 88 |
| 5.4 INCORPORACIÓN DE LA CORRIENTE DE NAFTA CRAQUEADA (100%) EN EL CASO BASE Y VERIFICACIÓN DE LAS CORRIENTES DE SALIDA (ALTERNATIVA 2)..... | 89 |
| 5.4.1 Determinación del porcentaje de aprovechamiento de la nafta craqueada en función del contenido de azufre..... | 89 |
| 5.4.2 Propiedades de la corriente de nafta craqueada liviana de acuerdo a los porcentajes de aprovechamiento determinados como viables | 92 |
| 5.5 Evaluación económica | 94 |
| Para determinar el potencial económico de las alternativas, es necesario conocer los ingresos dejados de percibir, la proyección de la evaluación económica, la inversión necesaria para desarrollarlas y por último verificar su viabilidad. | 94 |
| 5.5.1 Determinación de ingresos dejados de percibir en los últimos 4 años para la alternativa 1 | 94 |
| 5.5.2 Determinación de ingresos dejados de percibir en los últimos 4 años para la alternativa 2..... | 98 |
| 5.5.3 Inversión necesaria para construir la línea de nafta craqueada hacia la torre T-4565..... | 100 |
| 5.6.4 Inversión necesaria para construir la línea de la salida de fondo de la torre T-4565 hasta la línea de nafta como diluyente | 104 |
| 5.6.5 Proyección de la evaluación económica para la alternativa 1 | 105 |
| 5.6.6 Proyección de la evaluación económica para la alternativa 2 | 110 |
| 5.6.7 Ingresos totales a percibir | 114 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 115 |

| | |
|--------------------------|-----|
| 7. RECOMENDACIONES | 117 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 119 |
| ANEXOS..... | 125 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Compuestos parafínicos | 29 |
| Figura 2 Compuestos nafténicos | 30 |
| Figura 3 Compuestos aromáticos | 30 |
| Figura 4 Compuestos olefínicos..... | 31 |
| Figura 5 Compuestos Azufrados..... | 31 |
| Figura 6 Reacción típica de alquilación | 33 |
| Figura 7 Diagrama General de la Refinería de Barrancabermeja | 35 |
| Figura 8 Proceso de Alquilación | 36 |
| Figura 9 Sistema de rectificación del Alquilato | 39 |
| Figura 10 Relación de compresión alcanzada por los pistones de un motor | 47 |
| Figura 11 Diagrama de bloques de la metodología | 53 |
| Figura 12 Adición de tetraetilo de plomo (TEL) para alcanzar Números de Octano superiores a 100 | 64 |
| Figura 13 Características que señalan la posible incorporación de nafta craqueada a la corriente de alquilato total: (a) PIANO alquilato total (b) PIANO nafta craqueada (c) Curva de destilación nafta craqueada Vs alquilato total | 69 |
| Figura 14 Montaje de la torre rectificadora de Alquilato T-4565 en el software Aspen Hysys | 72 |
| Figura 15 Curvas de destilación ASTM D-86 para el alquilato liviano producto para los datos experimentales y los obtenidos por simulación | 73 |
| Figura 16 Número de octano de investigación (RON) para datos simulados y experimentales..... | 74 |
| Figura 17 Presión de vapor Reid (RVP) para datos experimentales y simulados.. | 75 |
| Figura 18 Montaje del mezclado en Aspen Hysys incorporación nafta craqueada en la alimentación | 76 |
| Figura 19 PIANO en la corriente de alimentación de acuerdo a la relación de mezclas..... | 82 |

| | |
|---|-----|
| Figura 20 PIANO simulado de la corriente de Alquilate Liviano de acuerdo a la relación de mezclas | 84 |
| Figura 21 Contenido de azufre de acuerdo a la simulación en función del porcentaje de aprovechamiento para la nafta craqueada liviana (producto de cima) y para la nafta craqueada pesada (producto de fondo) | 91 |
| Figura 22 PIANO de la corriente nafta craqueada liviana de acuerdo al porcentaje de aprovechamiento | 94 |
| Figura 23 Trazado de la línea de nafta craqueada hacia la torre T-4565..... | 101 |
| Figura 24 Trazado de la línea del fondo de la torre T-4565 hacia la línea de nafta como diluyente..... | 104 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Parámetros de calidad para la gasolina de aviación grado 100..... | 41 |
| Tabla 2 Normas ensayos ASTM | 54 |
| Tabla 3 Resumen de los resultados de laboratorio para alquilato total y alquilato liviano..... | 66 |
| Tabla 4 Datos de operación de la T-4565 (re-run) | 67 |
| Tabla 5 Datos curva de destilación ASTM D-86 para la nafta craqueada..... | 67 |
| Tabla 6 Compuestos azufrados presentes en la nafta craqueada | 68 |
| Tabla 7 Validación de datos en operación habitual de la torre T-4565 (re-run) con alquilato total como alimentación..... | 73 |
| Tabla 8 Condiciones del estado de operación habitual de la T-4565 (re-run) de acuerdo a la relación de mezclado | 77 |
| Tabla 9 Curvas de destilación ASTM D-86, RVP y Números de Octano de la corriente de Alquilato Liviano obtenidos por simulación en Aspen Hysys | 78 |
| Tabla 10 Variables a manipular para aumentar el porcentaje de aprovechamiento | 79 |
| Tabla 11 ASTM D-86, RVP, RON y MON para el alquilato liviano de acuerdo al porcentaje de nafta craqueada en la mezcla con alquilato total | 79 |
| Tabla 12 Contenido de azufre de la corriente de alimentación y de la corriente de alquilato liviano de acuerdo a la regla de mezclas en la T-4565..... | 80 |
| Tabla 13 Composición de compuestos azufrados en la corriente de alquilato liviano de acuerdo a la simulación | 81 |
| Tabla 14 Índice de octano para la regla de mezclas de las corrientes de alimentación y alquilato liviano de acuerdo al método de Albahri | 85 |
| Tabla 15 Adición de tetraetilo de plomo a la corriente de alquilato liviano de acuerdo a la relación de mezclas..... | 85 |
| Tabla 16 Índice de bloqueo de vapor (IBV) para las corrientes de alimentación y alquilato liviano | 86 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 17 Propiedades del producto de fondo de la destilación de acuerdo a la relación de mezclas utilizada | 87 |
| Tabla 18 Contenido de azufre simulado en la corriente de fondo de acuerdo a la regla de mezclas alquilato total-nafta craqueada..... | 87 |
| Tabla 19 Resumen de cálculo de la viabilidad de las mezclas de alquilato total-nafta craqueada | 88 |
| Tabla 20 Variables a manipular para determinar el porcentaje de aprovechamiento | 90 |
| Tabla 21 Ecuaciones y coeficiente de determinación (R^2) para las corrientes de nafta craqueada liviana y nafta craqueada pesada..... | 92 |
| Tabla 22 Propiedades de la nafta craqueada liviana de acuerdo al porcentaje de aprovechamiento | 93 |
| Tabla 23 Ventas históricas de alquilato liviano, precio del alquilato liviano producto y de la nafta craqueada | 95 |
| Tabla 24 Flujos volumétricos anuales de la torre T-4565 para el caso base..... | 96 |
| Tabla 25 Flujo de caja para el estado de operación actual de la torre T-4565..... | 96 |
| Tabla 26 Flujos volumétricos anuales de la torre T-4565 para la alternativa 1..... | 97 |
| Tabla 27 Flujo de caja para la alternativa 1 de la torre T-4565 | 97 |
| Tabla 28 Ingresos por concepto de ahorro de Alquilato Total..... | 98 |
| Tabla 29 Ingresos dejados de percibir en los últimos 4 años para la alternativa 1. | 98 |
| Tabla 30 Flujos de la torre T-4565 cargada con nafta craqueada | 99 |
| Tabla 31 Precios de las corrientes de nafta craqueada, nafta liviana y nafta pesada como diluyente..... | 99 |
| Tabla 32 Ingresos antes de costos de la alternativa 2 | 100 |
| Tabla 33 Costos trazado de la construcción de la línea de nafta craqueada hacia la torre T-4565 | 102 |
| Tabla 34 Costos de materiales para la construcción de la línea de nafta craqueada hacia la torre T-4565..... | 103 |
| Tabla 35 Inversión total mano de obra | 103 |
| Tabla 36 Predicción de la inflación para los próximos 5 años | 105 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 37 Precios de las corrientes involucradas para la alternativa 1 | 106 |
| Tabla 38 Ingresos totales alternativa 1 | 106 |
| Tabla 39 Costo tetraetilo de plomo para la mezcla de 80% de alquilato total y 20% de nafta craqueada | 107 |
| Tabla 40 TRM para los próximos 5 años..... | 108 |
| Tabla 41 Costo tetraetilo de plomo para la mezcla de 80% de alquilato total y 20% de nafta craqueada en dólares | 108 |
| Tabla 42 Valor presente de la alternativa 1 | 109 |
| Tabla 43 Valor presente de ingresos y costos para la alternativa 1 | 109 |
| Tabla 44 Precios de las corrientes involucradas en la alternativa 2 | 110 |
| Tabla 45 Ingresos brutos para la operación de la torre T-4565 alternativa 2 | 110 |
| Tabla 46 Costos de operación alternativa 2 (COP) | 111 |
| Tabla 47 Costos operacionales para la alternativa 2..... | 112 |
| Tabla 48 Valor presente alternativa 2 | 112 |
| Tabla 49 Valor presente de ingresos y costos para la alternativa 2 | 113 |
| Tabla 50 Valor presente del proyecto | 114 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|-----|
| Anexo A. Establecimiento del potencial de la nafta craqueada como alquilato liviano | 125 |
| Anexo B. Diseño de la torre de rectificación t-4565. | 126 |
| Anexo C. Validación de los datos de operación habitual de la torre | 128 |
| Anexo D. Determinación del ron y el mon | 131 |
| Anexo E. Cálculos de la incorporación de nafta craqueada estableciendo regla de mezclas | 134 |
| Anexo F. Cálculo de la adición de tetraetilo de plomo (tel) | 136 |

RESUMEN

PALABRAS CLAVE: Alquilero Total, Alquilero Liviano, Avgas, Nafta Craqueada, Azufre, curvas de destilación ASTM D-86.

AUTOR: Jhon Fredy Certuche Vásquez.

CODIRECTORA: Debora Alcida Nabarlatz.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo está orientado a potencializar el valor agregado de la Nafta Craqueada haciendo uso de su composición química y de la capacidad instalada disponible de la torre T-4565, para lo cual se plantearon dos alternativas de operación: la primera, mezclar el alimento actual de la torre (Alquilero Total) con nafta craqueada de la unidad UOP II (la cual presenta menor costo en el mercado) con el fin de producir Avgas, (el cual presenta un precio más atractivo que la nafta), y la segunda, aprovechar el tiempo muerto cuando la torre T-4565 esté fuera de servicio para alimentarla sólo con nafta craqueada, fraccionándola para disminuir su contenido de azufre hasta los niveles permisibles para su comercialización como gasolina con mayor valor comercial. Estas alternativas se llevaron a cabo a través de simulaciones en el software Aspen Hysys partiendo de datos experimentales y de diseño, calculando las propiedades de las corrientes involucradas en el proyecto mediante análisis de regla de mezclas. Esto permitió demostrar la viabilidad de las alternativas, encontrando en primer lugar que es posible realizar una mezcla en volumen de 80% de Alquilero Total con 20% de nafta craqueada para producir Alquilero Liviano esencial para la preparación de Avgas; y en segundo lugar, se demostró que al fraccionar un 50% en volumen de la nafta craqueada, es posible obtener una corriente de cima con un contenido de azufre aproximado a 300 ppm, límite máximo permitido de acuerdo a los parámetros de calidad regulados por la norma ambiental nacional. Se realizó la evaluación económica de cada una de estas alternativas, arrojando resultados muy positivos, obteniendo excelentes ingresos y una recuperación de la inversión en el corto plazo.

*Trabajo de grado

**Universidad Industrial De Santander. Facultad De Ingenierías Físico-Químicas. Escuela De Ingeniería Química. Directora: ALCIDA NABARLATZ Debora Ingeniera Química, Ph.D

ABSTRACT

KEYWORDS: Total Alkylate, Light Alkylate, Avgas, Cracking Naphtha, Sulfur, distillation curves ASTM D-86.

AUTHOR: Jhon Fredy Certuche Vásquez.

CODIRECTORA: Debora Alcida Nabarlatz.

DESCRIPTION:

This work aims to potentiate the added value of the Cracking Naphtha using its chemical composition and the available installed capacity of the T-4565 tower, for which two operation alternatives were proposed: First, mix the actual tower feed (Total Alkylate) with Cracking Naphtha from UOPII unit (which has a lower cost in the market) in order to produce Avgas, (which has a more attractive price than the naphtha), and second, use the time-out when the tower T-4565 is out of service just to feed it with Cracking Naphtha, fractionating it to decrease its sulfur content until the permissible levels for its commercialization as gasoline with a higher commercial value. These alternatives were conducted through simulations in the Aspen Hysys software based on experimental and design data, calculating the properties of the streams involved in the project by mixtures analysis rule. This allowed to demonstrate the alternative's viability, finding in first place that it is possible to make a volume mixture of 80% Total Alkylate with 20% of Cracking Naphtha to produce Light Alkylate essential for Avgas preparation; and secondly, it was demonstrated that fractionating 50% volume of the Cracking Naphtha, it's possible to obtain a top stream with lower sulfur content of 300 ppm approximately, the maximum allowance according to the quality parameters regulated by the environmental national standard. The economic evaluation was done for each alternative, showing very positive results, obtaining excellent earnings and a recovery of the investment in the short term.

*Degree Paper

**Universidad Industrial De Santander. Facultad De Ingenierías Fisico-Químicas. Escuela De Ingeniería Química. Directora: ALCIDA NABARLATZ Debora Ingeniera Química, Ph.D

INTRODUCCIÓN

La reversión al Estado Colombiano de la Concesión De Mares del 25 de agosto de 1951 dio origen a la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL), que había sido creada en 1948 por la Ley 165 del mismo año. Actualmente Ecopetrol S.A cuenta con dos Refinerías, la primera de ellas se encuentra ubicada en Barrancabermeja Santander y la segunda en Cartagena de Indias. En ese sentido, la empresa Ecopetrol S.A en la continua búsqueda por optimizar sus procesos y mejorar la productividad, actualmente desarrolla un proceso de capitalización del talento humano, realizando una alianza estratégica con la Universidad Industrial de Santander (UIS), con enfoque en la innovación y reinención, consolidándola como una de las mejores empresas de la industria de gas y petróleo a nivel mundial.

En la refinería ubicada en la ciudad de Barrancabermeja, Santander, Ecopetrol S.A en el año 2002 coloca en operación la nueva Planta de Alquilación, la cual cuenta con una torre de rectificación de alquilato total (T-4565) diseñada para cargar y rectificar alquilato total obteniendo por la cima de la torre alquilato liviano producto (usado como componente para la preparación de la gasolina de aviación Avgas) y por el fondo alquilato pesado producto como componente de la gasolina de uso automotor. Al analizar los datos de operación históricos del equipo, se puede evidenciar que esta torre no opera de forma continua, es decir, que opera en forma intermitente, permaneciendo fuera de servicio la mayor parte del tiempo, por lo que su capacidad diaria de procesamiento se encuentra subutilizada. Esta situación brinda la oportunidad para aprovechar el potencial de este equipo manipulando la carga a la torre, aumentando la rata de alimentación u operando la torre con otra materia prima (como por ejemplo nafta craqueada liviana) en los días que no procese alquilato total.

La nafta craqueada es un compuesto valioso, que para efectos de esta aplicación proviene de la unidad de recuperación de vapores (VRU) el cual es un subsistema que pertenece a la unidad de ruptura catalítica UOPII. Esta nafta, previamente estabilizada, se trata con soda con el fin de reducir el contenido de compuestos azufrados y luego es enviada al pool de gasolinas craqueadas.

En Ecopetrol S.A actualmente se realizan mezclas de nafta craqueada con alquilato total para la preparación de combustible automotor, debido a que la adición de alquilato mejora las propiedades de la misma, ya que permite por ejemplo minimizar el contenido de azufre obteniendo una gasolina o motonafta que cumpla con las actuales normas ambientales. El uso de alquilato total para esta actividad hace que se devalúe en precio al convertirse automáticamente en gasolina automotor, la cual se comercializa por un valor menor en el mercado al que realmente posee cuando se lo compara con la comercialización del alquilato liviano (derivado del alquilato total) comercializado como gasolina de aviación o aeronafta, dejando de percibir dividendos aún más atractivos para la compañía.

La mezcla entre la nafta craqueada y el alquilato total es posible debido a que este tipo de gasolinas presentan características físico-químicas afines. Por esta razón se considera que una fracción de la nafta craqueada de UOPII podría mezclarse parcialmente al alquilato total para alimentarse como carga a la torre T-4565, es decir, trascender de una gasolina básica automotor a una gasolina de mayor potencial económico en el mercado como lo es la gasolina de aviación, Avgas o aeronafta derivada del alquilato liviano producido en la torre.

De esta manera se busca aprovechar la disponibilidad y capacidad instalada de este importante activo de la unidad de Alquilación, innovando su modo operacional, reinventando el sistema para enriquecer el margen de ganancia, maximizando la utilización de este activo y el valor de la corriente de nafta, donde producto de la experimentación y el modelamiento se busca demostrar que es

posible utilizar una fracción efectiva de la nafta craqueada como aeronafta o en su defecto, utilizar la torre cuando esté fuera de servicio para rectificar el contenido de azufre en la nafta craqueada liviana. Es aquí en donde este importante reto apalancado con los respectivos estudios analíticos y la combinación de simulaciones con datos experimentales, pretende pasar de ser una excelente idea, a un exitoso logro que genere mayor utilidad económica para la empresa y el país.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Unidad de Alquileración de la Refinería de Barrancabermeja debe operar con una carga mínima (turndown) de 3000 barriles por día (BPD) de butanos/butilenos. Cuando la unidad opera por debajo del turndown se dificulta la operación de la sección de fraccionamiento con riesgos de afectar la calidad de los productos de acuerdo a estudios realizados por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) (Muñoz Espinosa, 2014). El volumen de producción promedio de Alquilerato Total (alimento a la torre) varía entre 1400 BPD y 1900 BPD como carga sostenida ocasional a la T-4565, lo cual no satisface la carga de diseño de esta torre de alquilerato liviano y el de los equipos asociados al sistema. Esta torre ha llegado a recibir una carga de 2500 BPD en sus inicios, demostrando suficiente capacidad de procesamiento por lo que permitiría alcanzar un mayor volumen de producción de alquilerato liviano.

Por otro lado, el punto final de ebullición (PFE) del alquilerato liviano obtenido como producto de dicha unidad debe ser máximo de 338°F, sin embargo la T-4565 (torre rectificadora de alquilerato de la unidad) actualmente sólo alcanza a recuperar alquilerato liviano con un punto final de ebullición de aproximadamente 267°F, perdiendo parte del alquilerato liviano (producto valioso) en el fondo como alquilerato pesado. Esto sucede debido a que el PFE está limitado por el control del parámetro de calidad del 10% en volumen destilado. Estos parámetros de calidad se interrelacionan, siendo directamente proporcionales entre sí, es decir que a medida que se incrementa el PFE ocurre lo mismo con el parámetro de destilación del 10%, el cual alcanza su valor máximo permitido de 167°F. Esto incide directamente en la disminución de la recuperación o aprovechamiento en volumen del producto valioso de cima (alquilerato liviano). Esta operación es susceptible de ser optimizada al incorporar la corriente de nafta craqueada liviana, debido a que

ésta tiene una temperatura del 10% en volumen destilado inferior a la del alquilato de carga a la T-4565, por lo que se esperaría aumente el PFE traduciéndose en un mayor volumen recuperado de alquilato liviano.

Otro de los problemas que afectan la unidad, es que el butano de campo utilizado para recobrar isobutano (reactivo utilizado en la obtención del alquilato total) es limitado y su composición es de baja calidad (baja pureza). El recibo de butano se hace por lotes desde los campos de producción en forma limitada, razón por la cual se consume en forma acelerada y no se logra mantener un inventario que suministre la cantidad requerida para lograr un volumen significativo de producción sostenida. Al sustituir una porción de alquilato total por nafta craqueada como carga a la torre rectificadora de alquilato T-4565, permite disminuir la rata de consumo de isobutano, teniendo en cuenta que actualmente es el reactivo que limita la producción de alquilato, ofreciendo la posibilidad de un mayor almacenamiento del mismo y su posterior utilización de acuerdo a las necesidades del proceso.

Por otro lado, Ecopetrol S.A actualmente no genera dividendos por venta o comercialización de alquilato total como producto (anteriormente se vendía a la empresa Refidomsa de República Dominicana), debido principalmente a la baja producción del mismo, dado que parte del alquilato total se envía al pool de nafta craqueada para mejorar la calidad de ésta, y a que otra parte se procesa como carga en la torre re-run (T-4565) para producir alquilato liviano a fin de solventar la demanda nacional de Avgas. En ese sentido, se encontró que países como Ecuador tienen la necesidad de importar grandes cantidades de combustible Avgas para satisfacer la demanda que presentan actualmente. De acuerdo al boletín 042 de mayo del 2011 la Coordinación General de Imagen Empresarial Ecuatoriana expresó que dicho país importa actualmente alrededor de 8000 barriles de avgas que le permiten tener suministro de combustible para un periodo de aproximadamente dos meses, por lo que se observa una creciente demanda de este combustible. Por otro lado, en Perú existe una preocupación debido a que la

poca oferta de combustible de aviación grado 100 limita el desarrollo de vuelos regionales, en donde los aviones ideales para el crecimiento de este sector, son las aeronaves de uno y dos motores, los cuales están diseñados para funcionar exclusivamente con este combustible (El comercio, 2015).

Para mejorar este aspecto, Ecopetrol S.A en el Departamento de Cracking II, tiene proyectado a mediano plazo realizar una importante inversión en la que se contempla aumentar y sostener la producción de alquilato total. Para ello inicialmente en la fase I espera producir un promedio de 2700 BPD, y posteriormente hacia el año 2017 en la fase II producir un promedio de 4500 BPD de alquilato total. (Muñoz Espinosa, 2014)

Por las razones anteriores, la propuesta es implementar alternativas al sistema en el corto plazo, que garanticen el flujo mínimo de carga a la torre T-4565 (permitiendo la operación mínima de diseño de los equipos), así como cumplir con los requerimientos de la demanda nacional de gasolina de aviación en el corto plazo de forma sostenida. Para ello se debe incrementar el tiempo de operación de la torre T-4565, así como disminuir el tiempo fuera de servicio alimentándola con nafta craqueada liviana. Esta nafta contiene un promedio de 900 ppm de azufre, lo cual genera inconvenientes para el departamento de productos terminados, dada la necesidad de dar cumplimiento a las partes por millón de azufre exigidas para su comercialización (Resolución 1180 De 2006, máximo 300 ppm), por lo que este parámetro se puede mejorar al rectificar su contenido de compuestos azufrados en la T-4565.

Con el fin de evaluar el comportamiento de la torre T-4565 se establecen las siguientes dos alternativas:

Alternativa 1: Cuando la unidad del Alquilación opere para la producción de alquilato liviano, se propone alimentar la T-4565 con una mezcla de alquilato total y nafta craqueada, permitiendo obtener una mayor disponibilidad de alquilato

liviano para la producción de gasolina de aviación. Esto brindaría la posibilidad de comercialización a nivel internacional con un mejor precio que la competencia, logrando mantener una producción continua y no por lotes como actualmente opera la unidad.

Al reemplazar la corriente de alquilato total parcialmente con nafta craqueada, se logra disponer de un mayor volumen de alquilato total que estaría disponible para su comercialización directa, lo cual permitiría recuperar contratos de exportación de alquilato total, ofreciendo la confiabilidad y competitividad que exige el mercado internacional, o emplearlo a satisfacción de las necesidades internas de la empresa, como por ejemplo para mejorar el contenido de azufre en la preparación de gasolina dentro de las especificaciones establecidas debido a su casi nulo contenido de azufre.

Alternativa 2: Cuando la T-4565 esté fuera de servicio o disponible, se propone alimentarla únicamente con nafta craqueada liviana con el fin de rectificar su contenido de compuestos azufrados presentes. Esto proporcionaría una nafta como producto de cima con menor contenido de azufre, lo cual permitiría la flexibilización de la preparación de gasolina producto en la refinería, por cuanto esta corriente presentaría características similares al valor del contenido de azufre de una gasolina extra comercializable.

Por otro lado, se obtendría por el fondo de la torre T-4565 un producto con características físico-químicas afines al aceite liviano de ciclo (diluyente) (ALC) que incrementaría proporcionalmente el rendimiento de este producto en la unidad.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Maximizar el aprovechamiento de una corriente de Nafta Craqueada utilizando la capacidad instalada de la torre T-4565 de la unidad de Alquilación, incorporándola como carga parcial o total a la torre.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Establecer las condiciones actuales de operación de la torre rectificadora de alquilato (T-4565) de la unidad de alquilación.
2. Determinar el porcentaje de nafta craqueada a incorporar en solución con alquilato total como carga a la T-4565 (RE-RUN) mediante un análisis de regla de mezclas.
3. Incorporar la corriente de nafta craqueada a la torre de acuerdo a los resultados obtenidos en la regla de mezcla alquilato-nafta y analizar los resultados obtenidos mediante simulación.
4. Evaluar el comportamiento operacional de la torre de rectificación de alquilato (T-4565) con una alimentación de 100% de nafta craqueada.
5. Evaluar los resultados y los beneficios económicos obtenidos comparándolos con el estado de operación actual de la torre.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 COMPOSICIÓN DEL PETRÓLEO

El petróleo está formado por una mezcla múltiple de compuestos orgánicos con diferentes puntos de ebullición, en su mayoría hidrocarburos, los cuales varían de acuerdo a su lugar de origen y definen el tipo de crudo conforme al número de carbonos y de su estructura molecular, ya sean estos sólidos, líquidos o gaseosos, también pueden contener azufre, nitrógeno, oxígeno, metales como hierro, níquel, vanadio y un contenido menor de otros elementos.

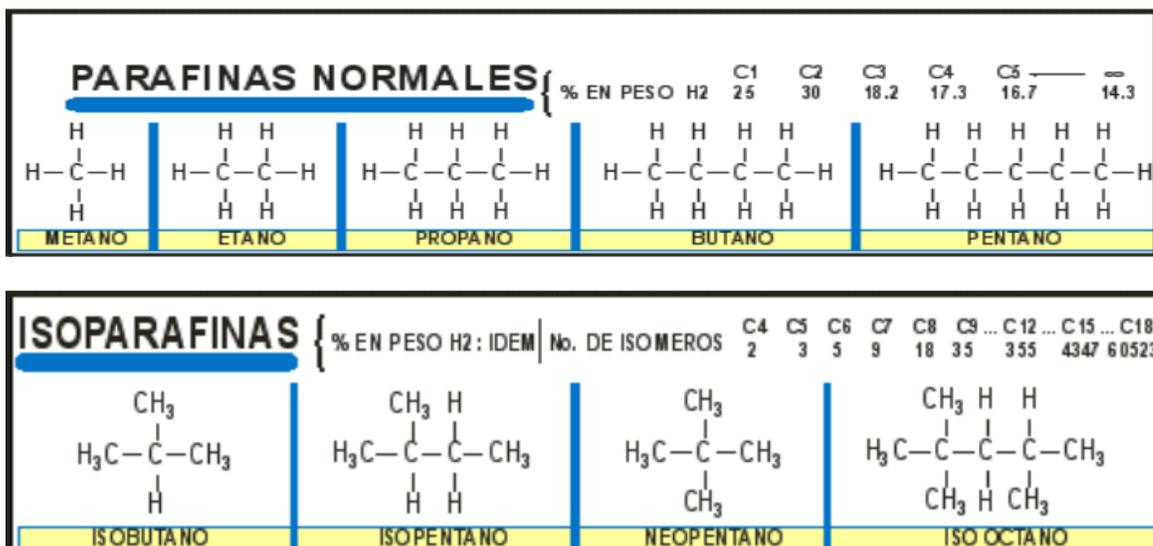
El contenido de azufre en el crudo varía en el rango de 0.03% en peso a valores superiores al 8%, (Rall y col., 1972), e incluso hasta el 30%, (Kropp y Fredorak, 1998). Los constituyentes más importantes son compuestos orgánicos azufrados, azufre inorgánico como azufre elemental, ácido sulfhídrico y piritas (Tissot y col., 1984). Conforme aumenta el peso molecular de los hidrocarburos, la composición de este se torna aún más compleja, dificultando su caracterización química con los análisis tecnológicos actuales. Dentro de los grupos identificados hasta ahora podemos encontrar los siguientes:

3.1.1. Parafínicos

Los compuestos parafínicos (alcanos) son hidrocarburos con átomos de carbono de cadena lineal y poco reactivos, su fórmula general es C_nH_{2n+2} . (Murrugarra Peláez, 2007). Estos a su vez se dividen en dos categorías, parafinas normales e isoparafinas, donde las isoparafinas se diferencian de las parafinas en su arreglo estructural, mientras las parafinas están constituidas por átomos de carbono lineal, las isoparafinas presentan átomos de carbono ramificados que le permiten obtener

características de mejor aprovechamiento, como por ejemplo el octanaje, el cual es mayor en las isoparafinas.

Figura 1 Compuestos parafínicos



Fuente: Instituto Mexicano del Petróleo, 2014

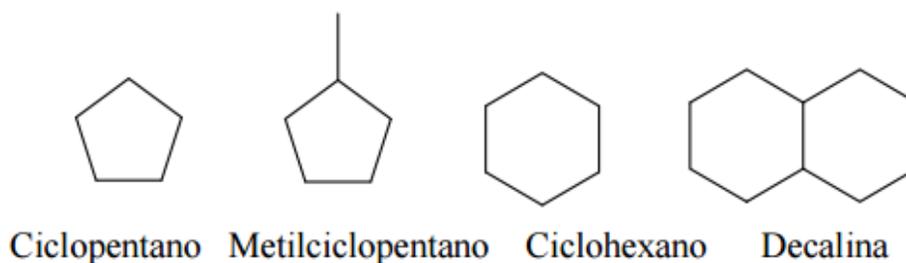
3.1.2. Ciclo parafinas o naftenos

Los compuestos ciclo parafínicos (ciclo alcanos) son aquellos hidrocarburos de cadena cerrada que tienen como fórmula general C_nH_{2n} . Los más comunes son los compuestos con 5, 6 o 7 carbonos, aunque también se presentan con mayor cantidad de átomos de carbono, e incluso llegan a formar estructuras complejas tal como se observa en la figura 2. (Murrugarra Peláez, 2007)

3.1.3 Aromáticos

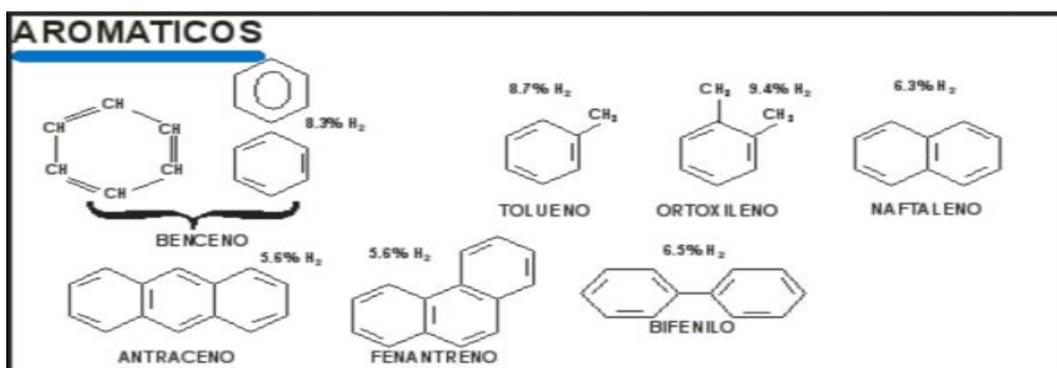
Los compuestos aromáticos son aquellos derivados del benceno, los cuales tienen como fórmula C_nH_{2n-6} . El anillo bencénico puede presentar cadenas laterales, o unirse con otros anillos de benceno. En un crudo a medida que aumenta su punto de ebullición, se incrementa también el porcentaje de aromáticos presentes en él.

Figura 2 Compuestos nafténicos



Fuente: Murrugarra Peláez, 2007

Figura 3 Compuestos aromáticos

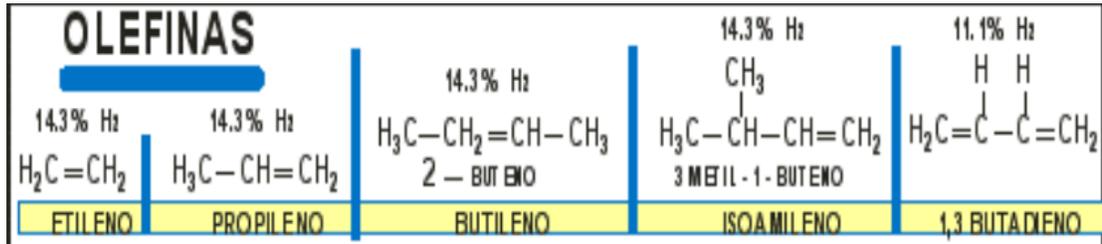


Fuente: Instituto Mexicano del Petróleo, 2014

3.1.4 Olefinas

Son hidrocarburos que poseen en su estructura molecular uno o más enlaces dobles. Se caracterizan por ser inestables y reactivas, las olefinas se pueden polimerizar, deshidrogenar, generar compuestos aromáticos y se oxidan con facilidad, generalmente en productos como la gasolina, se logran estabilizar con la adición de antioxidantes en bajas concentraciones.

Figura 4 Compuestos olefínicos

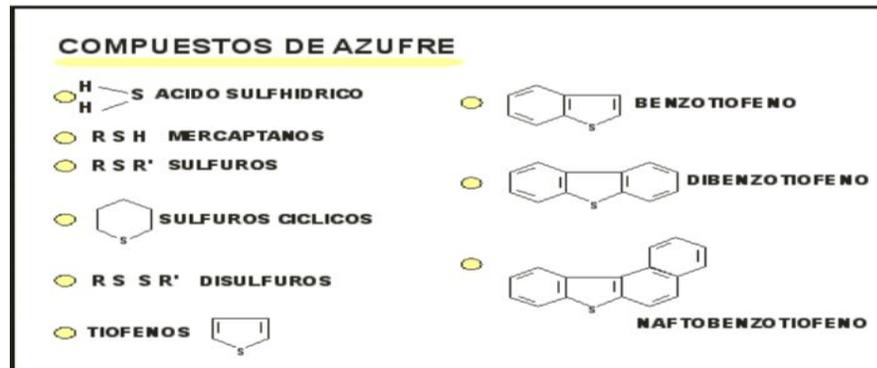


Fuente: Instituto Mexicano del Petróleo, 2014

3.1.5 Azufre

El petróleo está integrado por diversos compuestos orgánicos azufrados como sulfuros, tioles (mercaptanos) y compuestos heterocíclicos como los tiofenos. Su distribución química varía de acuerdo a las condiciones ambientales de formación del crudo, pueden contener benzotiofenos, dibenzotiofenos, ácido sulfúrico, entre otros. En la figura 5 se presentan los principales grupos de compuestos azufrados

Figura 5 Compuestos Azufrados



Fuente: Instituto Mexicano del Petróleo, 2014

3.2 PROCESOS DE REFINACIÓN DEL PETRÓLEO

a) Destilación: Es un proceso de separación de sustancias que se lleva a cabo físicamente por un intercambio térmico utilizando los diferentes puntos de ebullición de cada componente en particular. Existen diferentes tipos de

destilación fraccionada, si se realiza con la presión del ambiente se denomina destilación atmosférica y cuando se realiza a presiones negativas se denomina destilación al vacío.

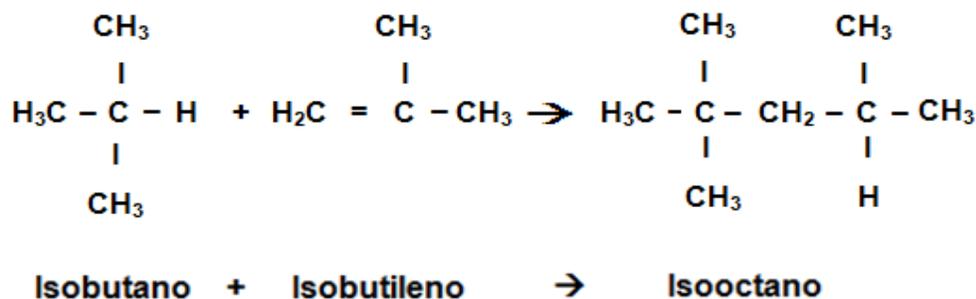
Generalmente las fracciones volátiles del petróleo se separan mediante la destilación a presión atmosférica, las fracciones menos volátiles o más pesadas se separan mediante la destilación al vacío. (Reyes Habib, 2007).

b) Craqueo: Es un proceso de ruptura molecular mediante pirolisis y se puede realizar por craqueo térmico o catalítico. El craqueo térmico se realiza vaporizando una fracción pesada de petróleo y condensando los productos de acuerdo a sus puntos de ebullición como por ejemplo GLP, nafta, Jet, Kerosene, Diesel, etc. Las moléculas más complejas de fraccionar se descomponen mediante el craqueo catalítico en presencia de catalizador, generalmente una zeolita con base de alúmina que acelera la reacción.

c) Alquilación: Es un proceso de reacción entre alquenos (olefinas) con isoparafinas en presencia ácido como catalizador para producir alquilato de alto octanaje, el cual está compuesto principalmente por hidrocarburos con estructura ramificada. Los catalizadores empleados en la reacción de alquilación principalmente son el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido sulfhídrico (HF) de alta concentración. En el caso del H_2SO_4 , el catalizador se desactiva cuando su concentración baja del 90%, por lo que es necesario mantener una inyección de ácido fresco para concentrarlo periódicamente. Para el caso del ácido fluorhídrico (HF) su reciclaje se hace más difícil debido a que los ácidos manejados son muy corrosivos y requiere una metalurgia especial para los equipos (Sánchez & Oviedo, 1998).

La reacción típica que se lleva a cabo en la alquilación se ilustra como sigue:

Figura 6 Reacción típica de alquilación



Fuente: Sánchez & Oviedo, 1998

En la etapa inicial del proceso, la olefina forma con el ácido un ion alquil-carbonio que interactúa con otra molécula de olefina para producir, por transferencia de hidrógeno intermolecular, un dímero protonizado. En la etapa final, este compuesto intermedio produce, con la olefina, el iso-octano y regenera el ion alquilcarbonio para reanudar el proceso. Sin embargo, es importante anotar que en el proceso actual, después de un tiempo de contacto con los ácidos líquidos, el alquilato formado se degrada.

d) Reformación: Este proceso se fundamenta en modificar la estructura química de los componentes de la gasolina para aumentar su índice de octano, convirtiendo hidrocarburos de cadena lineal en hidrocarburos con cadena ramificada de mayor octanaje. Mediante la reformación térmica, los alcanos son transformados principalmente en alquenos, con un alto porcentaje de metano, etano y aromáticos. No todas las cicloparafinas son craqueadas y como resultado la relación de rendimiento/octanaje es pobre.

e) Hidrotratamiento: El término hidrotratamiento identifica a un amplio grupo de procesos que utilizan el hidrógeno como reactante. En la industria del petróleo, consiste en poner en contacto la alimentación de hidrocarburos con hidrógeno en presencia de un catalizador y bajo condiciones de operación apropiadas, bien sea

para preparar cargas a otros procesos, mejorar la calidad de productos terminados o convertir fracciones en otras de menor punto de ebullición.

Entre los procesos de hidrotratamiento más utilizados por la industria petrolera están el Hidrotratamiento de Naftas Vírgenes y el Hidrotratamiento de Naftas de Conversión (Reyes Habib, 2007).

3.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA

La actividad petrolera en Colombia inició con la puesta en producción del campo La Cira-Infantas ubicado en el corregimiento El Centro de Barrancabermeja. La Empresa Colombiana de Petróleos, ECOPEPETROL (anteriormente llamada Tropical Oil Company) asumió los activos revertidos al Estado Colombiano mediante la Concesión De Mares el 25 de Agosto de 1951.

El primer equipo de destilación de crudo de la Refinería de Barrancabermeja fue un alambique traído del Perú, el cual se instaló en el área de la unidad de Topping, en el lugar que ocupan actualmente las calderas Kellogs, además se instalaron tanques y chimeneas para procesar 1500 barriles de crudo inicialmente.

En ECOPEPETROL, actualmente ECOPEPETROL S.A, se procesan crudos de diferentes características químicas para suplir la demanda del mercado nacional referente a combustibles y otros derivados del petróleo. Los productos terminados y el recibo de crudos se realizan en el área de Materias Primas y Productos Terminados. Las unidades de refinación producen principalmente gasolinas y destilados medios como el Jet. En el área de petroquímica se elaboran bases lubricantes, parafinas, aromáticos y polietilenos.

La Refinería de Barrancabermeja cuenta con cuatro (4) unidades de craqueo catalítico fluidizado para procesar las cargas con mayor peso molecular, se mencionan en orden cronológico de diseño y de menor a mayor capacidad de

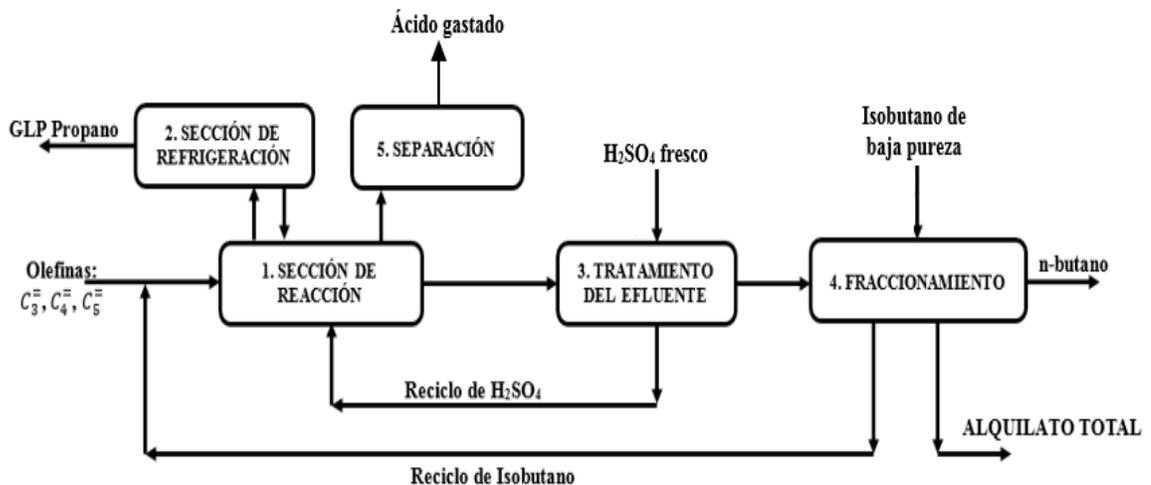
3.3.1 Descripción general de la unidad de Alquilación

La Unidad de Alquilación de la Refinería de Barrancabermeja, inició su operación el 22 de Noviembre de 2002, cargando butanos-butilenos provenientes de las Unidades de Ruptura Catalítica; Modelo IV, Orthoflow, UOP I y UOPII. Está diseñada para procesar mezclas de butanos-butilenos e isobutano en presencia de ácido sulfúrico como catalizador con el objetivo de promover la reacción de alquilación produciendo alquilato (utilizado como componente de alto octano de la gasolina para exportación) y alquilato liviano de alto octanaje (utilizado como componente para la preparación de Avgas). La carga mínima a la Unidad de Alquilación (turndown) por diseño corresponde a 3000 BPD de carga de butanos/butilenos con la Unidad de Hidroisomerización fuera de servicio.

La unidad de alquilación consta de 5 secciones así: Sección de reacción, sección de refrigeración, tratamiento del efluente, fraccionamiento y separación (Blowdown).

En la figura 8 pueden observarse las 5 secciones que comprenden la Unidad de Alquilación.

Figura 8 Proceso de Alquilación



Fuente: (Branzaru, 2001)

a) Sección de reacción: En esta sección se ponen en contacto, bajo condiciones controladas, los hidrocarburos y el catalizador ácido sulfúrico (la unidad de alquilación tiene una torre splitter de isobutano / butilenos, aguas arriba de la sección de reacción para retirar parte del exceso de olefinas de la unidad).

b) Sección de refrigeración: El proceso de Alquilación utiliza un sistema de refrigeración para remover el calor de la reacción y controlar la temperatura en los contactores. Con la refrigeración del efluente, los hidrocarburos en contacto con el catalizador (ácido sulfúrico) se mantienen en fase líquida.

c) Tratamiento del efluente: En esta sección, el ácido libre, los sulfatos de alquilo y sulfatos de di-alquilo son removidos del efluente neto del reactor para evitar corrosión e incrustaciones en los equipos aguas abajo.

d) Fraccionamiento: En esta sección, se recupera el isobutano para luego recircularlo a la sección de reacción. Los hidrocarburos livianos remanentes son separados de los productos deseados.

e) Separación (Blowdown): En esta sección, se desgasifica el ácido gastado, se ajusta el pH al agua residual y las corrientes de venteo ácidas se neutralizan antes de enviarlas fuera de la planta.

3.3.2 Sistema de rectificación de alquilato

Una parte del alquilato total se carga a la torre rectificadora de alquilato (T-4565) de la sección de fraccionamiento (Figura 9). Esta corriente fluye a través del intercambiador de carga / fondos de la torre rectificadora (E-4585), antes de cargarse a la torre rectificadora de alquilato. El producto neto de la cima de la torre rectificadora es el alquilato liviano de aviación y el producto de fondo es el alquilato pesado. Los vapores de cima de la torre rectificadora de alquilato se condensan en los condensadores de la torre rectificadora de alquilato con agua de enfriamiento y son colectados en un acumulador de cima de la T-4565. Una parte del líquido del acumulador se envía como reflujo al plato superior de la torre con

ayuda de la bomba de cima de la torre de alquilato (P-4578A/B). El resto de líquido se envía al enfriador de alquilato de aviación (E-4584), donde se enfría a 100°F, para luego ser enviado al tambor de lavado cáustico del alquilato liviano de aviación (D-4582) para neutralizar componentes ácidos. Para ello, se pone en contacto una solución de soda cáustica con el alquilato liviano de aviación en un mezclador estático en línea aguas arriba del tambor de lavado cáustico. La emulsión resultante se deja sedimentar en el tambor de lavado cáustico para asegurar la separación de las fases soda/hidrocarburo. La fase acuosa (solución cáustica) se recircula a la entrada del mezclador estático. La solución cáustica fresca al 12% en peso, se adiciona por lotes al tambor de lavado cáustico cuando la concentración de soda caiga a un 3% en peso. La solución de soda cáustica gastada de 3% en peso se retira intermitentemente al tambor desgasificador de agua. La corriente de alquilato liviano de aviación fluye del tambor de lavado cáustico a los tanques de almacenamiento.

Los fondos de la torre (alquilato pesado) se envían al intercambiador carga / fondos de la torre rectificadora con ayuda de la bomba de alquilato pesado (P-4583A/B), donde es enfriado a 187°F, y luego fluye al enfriador de alquilato pesado (E-4586), donde se enfría a 100°F. El alquilato pesado producto finalmente se mezcla con el alquilato total del fondo de la Debutanizadora, antes de enviarlo a almacenamiento (Branzaru, 2001)

usado comúnmente en aviones tipo DC3, y por último el combustible 115/145 usado en aviones militares antiguos, por lo cual en la actualidad se tiene bajo consumo del mismo. Los números que caracterizan a cada aeronafte se refieren a la calidad del octanaje y responden a un uso y costumbre generalizada (Cerutti, 2001).

3.4.1 Alquilato de aviación o Avgas (100-130)

La gasolina de aviación o aeronafte grado 100, conocida también como Avgas, es un combustible de alto índice antidetonante (alto octanaje), producido a partir de gases de refinería (butilenos e isobutanos) que se hacen reaccionar con un catalizador (ácido sulfúrico) en un proceso de alquilación para obtener un componente denominado alquilato. Al alquilato total se le adicionan compuestos aromáticos (que tienen mayor octanaje) de manera que se alcance un octanaje motor (MON) de 100 como mínimo, además para conseguir la capacidad antidetonante de 130 se le adiciona tetraetilo de plomo; por esta razón, este producto también se denomina gasolina de aviación 100-130. El número 100 significa la capacidad antidetonante requerida por los motores de pistón de los aviones una vez alcanzada la velocidad de crucero y el número 130 identifica la capacidad antidetonante requerida para el despegue, que es cuando los motores de pistón desarrollan la máxima potencia. La reglamentación ambiental vigente no permite el uso de esta gasolina en motores de automóviles, pues contiene plomo, sustancia que daña los convertidores catalíticos de los vehículos.

Por otro lado, hay que tener claros los parámetros de calidad que rigen la producción de gasolina de aviación grado 100 dado que una vez realizado el proceso de mezclado para su producción quedarán definidos estos parámetros.

En la siguiente tabla se resumen dichos parámetros:

Tabla 1 Parámetros de calidad para la gasolina de aviación grado 100

| PROPIEDADES/ CARACTERÍSTICAS | UNIDADES | ESPECIFICACIÓN | |
|---------------------------------|-------------------|----------------|--------|
| | | Mínimo | Máximo |
| Azufre | g/100g | | 0,05 |
| Calor neto de combustión | kJ/kg | 43500 | |
| Color | N/A | Verde | |
| Destilación | | | |
| Punto inicial de ebullición | °C | Reportar | |
| 10% vol. Evaporado | °C | | 75 |
| 40% vol. Evaporado | °C | 75 | |
| 50% vol. Evaporado | °C | | 105 |
| 90% vol. Evaporado | °C | | 135 |
| Punto final de ebullición | °C | | 170 |
| 10% + 50% | °C | 135 | |
| Goma potencial, 5h | mg/100ml | | 6 |
| Tetraetilo de plomo | ml/l | | 1.06 |
| Densidad a 15°C | kg/m ³ | Reportar | |
| Número de octano motor | Octanos | 99,6 | |
| Número de octano supercarga | Octanos | 130 | |
| Presión de vapor, 38°C | kPa | 38 | 49 |
| Punto de congelación | °C | | -58 |

Fuente: Ecopetrol S.A., 2015

El combustible Avgas se clasifica como un líquido inflamable clase 1A de acuerdo con la Norma 321 de la NFPA (National Fire Protection Association), por lo cual debe manejarse con especial cuidado y es indispensable cumplir con los estándares para el diseño de tanques de almacenamiento, tuberías, sitios de tanqueo y equipo de las estaciones de servicio al público. Este producto es volátil y genera vapores desde -43°C, que al mezclarse con aire en proporciones de 1,1% a 7,6% en volumen producen mezclas inflamables y explosivas (Ecopetrol S.A., 2012).

3.4.2 Nafta craqueada

La nafta craqueada es un derivado del petróleo que nace producto del craqueo de moléculas del hidrocarburo de alto peso molecular en presencia de un catalizador de lecho fluidizado, generalmente conformada por una mezcla de hidrocarburos en un intervalo entre butano (C4) y decano (C10) con rangos típicos de ebullición desde 100°F hasta 450°F comúnmente denominada nafta catalítica.

Dependiendo de la composición de la relación entre parafinas lineales o ramificadas, ciclo parafinas o naftenos y aromáticos, dependen las propiedades finales de la gasolina.

La gasolina, se utiliza como combustible en motores de combustión interna de encendido por chispa. Su calidad está definida por ciertas propiedades físicas, ligadas generalmente a su composición química y al uso de ciertos aditivos para mejorar algunas de sus propiedades.

La corriente de nafta craqueada de interés proviene de la torre debutanizadora de la unidad de cracking UOPII, en esta torre se ajusta la presión de vapor reid de acuerdo a necesidades de proceso y seguidamente se trata con soda con el propósito de reducir parcialmente el contenido de compuestos azufrados hasta alrededor de 800 ppm típicamente, cabe anotar que este contenido de azufrados puede variar de acuerdo a la variación en la composición de la carga a la unidad de ruptura catalítica (gasóleo, DMO, DMOH). La nafta craqueada tratada se envía al pool de gasolinas craqueadas donde será mezclada y mejorada para finalmente comercializarla como gasolina automotor.

3.4.3 Riesgos en aviones a pistón

Ecopetrol S.A. viene registrando que algunas empresas operadoras de aviones con motor de pistón han optado por reemplazar el uso cotidiano del combustible de aviación Avgas 100/130 por el de la gasolina extra que normalmente usa el transporte terrestre. Este cambio de combustibles, que obedece al diferencial de precio, entraña un peligro potencial de consecuencias incalculables y un riesgo para las condiciones de seguridad de este sector del transporte aéreo. Además de

ser altamente volátil y con una calidad menor a la requerida en aviación, la gasolina extra que produce Ecopetrol tiene un octanaje (87) que no se ajusta para ser utilizado como combustible de reemplazo de la gasolina de aviación, ya que puede producir unas mezclas inflamables y explosivas. La gasolina de aviación 100/130, conocida técnicamente como Avgas, es un combustible de alta calidad antidetonante. (Ecopetrol S.A., 2004)

Esto señala que existe un peligro potencial, debido a que la gasolina difiere en la composición química con respecto al Avgas, lo cual varía el valor energético de las moléculas de combustibles que se van a quemar, es decir, cuánta energía química se transforma en energía mecánica y cuánta potencia estará disponible. Teniendo en cuenta que los hidrocarburos son elementos compuestos por carbonos e hidrógenos y difieren entre sí por el número de átomos de carbono que integran la molécula, a mayor número de átomos de carbono mayor será el punto de ebullición; al verificar las curvas de destilación de las motonaftas se encuentra que éstas se componen de hidrocarburos con mayor cantidad de carbonos e hidrógenos que las aeronaftas. Por este motivo, es necesario fraccionar la nafta craqueada y retirar los compuestos de mayor punto de ebullición, es decir de mayor peso molecular, dado que si existiere un excedente de hidrocarburos o una disminución del oxígeno diferente a la relación existente con el Avgas, quedarán residuos de la combustión que se presentarán como incrustaciones carbonosas y polímeros. Esto significa que habrá un excedente de carbono si el hidrocarburo involucrado es de mayor punto de ebullición debido a que son compuestos más complejos con mayor número de átomos de carbono, por lo tanto, al utilizar motonaftas en motores de aviación, el exceso de carbonos e hidrógenos provocará una reacción incompleta, ocasionando una pérdida de energía, lo cual se traduce en una pérdida de potencia en el motor y un aumento en los gases contaminantes. Para evitar estos inconvenientes, se debe realizar la correcta caracterización físico-química de las aeronaftas obtenidas, la cual se pretende alcanzar realizando el corte adecuado de la nafta craqueada en la torre T-4565.

En este sentido, los resultados se deben verificar mediante el método estandarizado para la determinación de las composiciones químicas con el ensayo de destilación ASTM-D-86. Este método permite comparar los componentes químicos por su punto de ebullición agrupándolos por fracción de volumen.

3.5 MEZCLA DE AVGAS CON GASOLINA AUTOMOTRIZ

Las gasolinas son generalmente catalogadas con base en su índice de anti detonación (Antiknock index, AKI), una medida de la calidad del octanaje. AKI es una medida de la capacidad de la gasolina para resistir la detonación en el motor (ping). El AKI de la gasolina es el promedio del “Research Octane Number (RON)” y el “Motor Octane Number (MON)”, o $(RON+MON)/2$. Este es el número que exhiben las bombas en sus surtidores indicando el octanaje del combustible en muchos países como EE.UU., entre otros. El mejor rendimiento y economía de la gasolina se obtienen cuando el AKI de la misma (octanaje) es el adecuado para el motor en el cual se está llevando a cabo la combustión.

Cuando no se dispone de combustibles de calidad adecuada para los motores de marca Rotax 912/914, las gasolinas Avgas, extra y corriente pueden ser mezcladas en cualquier proporción para mejorar la calidad de las gasolinas automotrices. (Cerutti, 2001).

3.6 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

En la industria del petróleo, se aplican ensayos para el petróleo y sus derivados, los cuales permiten mejorar el control de las operaciones de refinación, las cuales deben ser reguladas para obtener productos que satisfagan las condiciones requeridas mediante sus respectivas especificaciones.

En el caso de las gasolinas, aunque son muchas las pruebas importantes que se les realiza, hay siete parámetros que afectan en mayor grado el desempeño de la

misma: curvas de destilación, presión de vapor reid, índice de bloqueo de vapor, octanaje, contenido de azufre, contenido de gomas e índice de cetano.

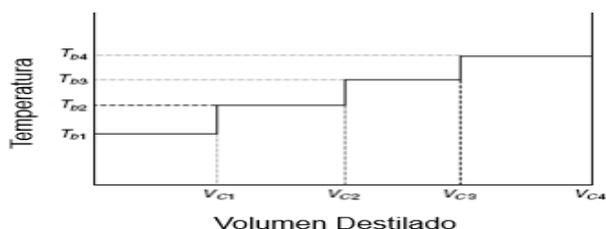
3.6.1 Destilación atmosférica

La cantidad de compuestos volátiles presentes en una mezcla brinda una idea sobre la seguridad y rendimiento. En el caso particular de los combustibles da información acerca de la composición durante su almacenamiento y uso (Hookey, 2000).

Para un proceso de destilación por lotes donde se produce la separación de los componentes en una mezcla, la curva de destilación puede ser representada por un número de pasos igual al número de componentes en la mezcla (Figura 10). El punto de ebullición a una presión dada (por lo general atmosférica) se representa frente a la fracción destilada, comúnmente en una base de volumen.

En la figura 10, V_{c1} y T_{b1} son el volumen destilado y la temperatura de ebullición del compuesto 1, respectivamente. $V_{c2} - V_{c1}$ y T_{b2} son el volumen destilado y la temperatura de ebullición del componente 2, respectivamente y así sucesivamente (Ali-Assady, 2009).

Figura 10 Curva de ASTM D-86 de una mezcla con número limitado de componentes



Fuente: Ali-Assady, 2009

3.6.2 Presión de Vapor Reid (RVP)

La presión de vapor Reid (Reid Vapor Pressure, RVP) se utiliza con frecuencia como una indicación de la volatilidad de los hidrocarburos líquidos. La RVP se define como la presión absoluta (es decir, psia o bar) ejercida por una mezcla,

determinada a 100°F (37.8°C) y a una relación volumétrica de vapor a líquido de 4 (Fahim, Al-Sahhaf, & Elkilani, 2009).

La presión de vapor de una gasolina de aviación es la medida de la tendencia a evaporarse de los componentes más volátiles. La experiencia ha demostrado que los combustibles con una presión de vapor Reid menor a 49 kPa no causan bloqueos de vapor bajo la mayoría de condiciones de utilización de la aeronave (Gonzalez, 1989).

La Presión de Vapor Reid (RVP) de una mezcla se obtiene mediante la aplicación de la Ley de Raoult, y se calcula como el promedio de las Presiones de Vapor Reid de los componentes que conforman la mezcla (Gary, Handwerk, & Kaiser, 2004).

La fórmula empleada para el cálculo es:

$$M_t(RVP)_t = \sum M_i(RVP)_i \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

M_t = Número total de moles de la mezcla final

$(RVP)_t$ = Presión de Vapor Reid obtenida

M_i = Número de moles del componente i

$(RVP)_i$ = Presión de Vapor Reid de cada componente

3.6.3 Índice de bloqueo de vapor (IBV)

El índice de bloqueo de vapor (IBV) es un parámetro que sirve para controlar el exceso de vapores en la gasolina que impide el flujo normal en la línea de combustible hacia la cámara de combustión del motor. Se calcula a partir de la presión de vapor reid (RVP) y el porcentaje de evaporación a 70°C (158°F) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$IBV = 10 * RVP + 7 * \% \text{ Evaporado}_{70^\circ C} \quad \text{Ecuación 2}$$

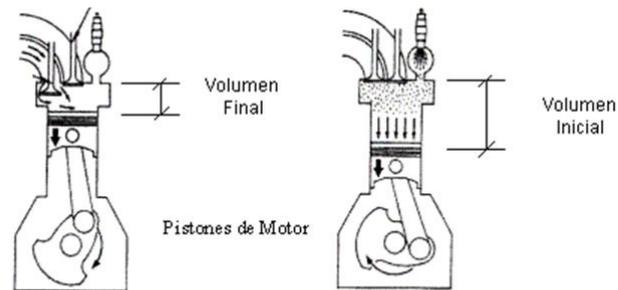
El rango normal es de 800 a 1250. Los valores más bajos proporcionan una mayor protección contra el bloqueo de vapor y los problemas de manejo de combustible calientes (Chevron, 2009).

3.6.4 Octanaje

El octanaje es una característica de los carburantes utilizados en los motores de encendido por bujía y determina las cualidades antidetonantes de combustión de las gasolinas. En las reacciones de combustión, existe la formación de compuestos intermedios (peróxidos), que se descomponen violentamente provocando una explosión o detonación. Esta detonación debe coincidir al alcanzar la relación de compresión; si sucede antes se generará un golpeteo que no dejará alcanzar la relación de compresión eficiente. Si la detonación ocurre después de alcanzar la relación de compresión, no se presentará el golpeteo (Wuithier, 1971).

El ensayo empleado para la determinación del octanaje se realiza mediante el procedimiento descrito en la norma ASTM D-2699. La prueba se realiza en un motor prototipo y se miden dos tipos de octanaje RON y MON.

Figura 10 Relación de compresión alcanzada por los pistones de un motor



$$\text{Relación de Compresión} = \frac{\text{Volumen Inicial}}{\text{Volumen Final}}$$

Fuente: (PDVSA, 1998).

El octanaje de carretera RON (Research Octane Number) se refiere al porcentaje en volumen de isooctano que se requiere en una mezcla de isooctano y n-heptano para dar una detonación incipiente en un motor de automóvil, que opera en las mismas condiciones de carga, velocidad (600 rpm) y grado de encendido de motor que el del combustible ensayado. El octanaje para motor MON (Motor Octane Number) es similar a la definición de RON. Sin embargo, el motor de prueba opera a 900 rpm y el ensayo se aproxima a las condiciones de velocidad de crucero de un automóvil (PDVSA, 1998).

3.6.5 Contenido de azufre

El contenido de azufre máximo permitido en el Avgas es de 0.05g/100g, es decir 500 ppm (Ecopetrol S.A., 2012). Este control se realiza principalmente para proteger el medio ambiente, porque los compuestos del azufre, en especial el dióxido de azufre (SO₂) es uno de los contaminantes más nocivos y de mayor riesgo para la salud, dado que a nivel mundial se emiten $79 \cdot 10^{12}$ g/año de compuestos azufrados producto de la combustión. (Brown Theodore L, 2013).

3.6.6 Contenido de gomas

Las gomas son moléculas condensadas por oxidación y polimerización de olefinas inestables. Los altos contenidos de gomas pueden ocasionar taponamientos en los accesorios internos del motor. Una elevada acumulación puede obstruir el sistema de aspiración y filtros. Para determinar el contenido de gomas en una gasolina se emplea el procedimiento contemplado en la norma ASTM D-381 (Murrugarra Peláez, 2007).

3.7 COMPUESTOS ANTIDETONANTES EN LA GASOLINA

Los compuestos antidetonantes son aquellos aditivos que impiden que la gasolina explote con demasiada rapidez dentro de los cilindros de un motor. Por otro lado

estos compuestos se caracterizan porque pueden lograr que las gasolinas alcancen índices de octano superiores a 100. Esto ayuda a mejorar la calidad de las gasolinas que tienen octanajes bajos, o en el caso del Avgas lograr un octanaje de 130.

3.7.1 Tetraetilo de plomo (TEL)

El antidetonante más usado es tal vez el tetraetilo de plomo (TEL), el cual aunque presenta un alto riesgo ambiental y han surgido nuevos sustitutos, sigue siendo el antidetonante elegido más frecuentemente (Hamilton, Reznikoff, & Burnham, 1993).

El tetraetilo de plomo tiene un efecto diferente de acuerdo al tipo de gasolina al que se adicione, subiendo el octanaje de hidrocarburos ramificados o isoparafinas en mayor proporción.

Todo lo contrario ocurre cuando el tetraetilo de plomo entra en contacto con gasolinas con alto contenido de olefinas y azufre, ya que la susceptibilidad disminuye, es decir que el índice de octano no subirá la misma proporción que una corriente con mayor presencia de isoparafinas (Chow Pangtay, 1998).

3.7.2 Metil ciclopentadienil tricarbonil manganeso (MMT)

El antidetonante denominado MMT, es un compuesto órgano-metálico derivado del manganeso, el cual se encuentra aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). La dosis recomendada oscila entre 8 y 18 mg Mn/L.

El MMT logra una reducción en la emisión de NO_x en el escape y el aumento del número de octano. La respuesta del número de octano ante la presencia del MMT es menor que la del TEL, es decir en concentraciones iguales de estos

antidetonantes el TEL logrará subir el octanaje más puntos que el MMT (Cerutti, 2001).

3.7.3 Metil terbutil éter (MTBE)

El antidetonante MTBE, es un compuesto oxigenado, el cual es usado para lograr una combustión más completa, reducir los contaminantes del aire y lograr un aumento en el octanaje de los combustibles (California Environmental Protection Agency, 2002).

El MTBE se ha convertido en el aditivo oxigenado de preferencia por las refinerías europeas cubriendo un 98% de la producción de la Unión Europea (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2011).

Ha sido catalogado tentativamente como cancerígeno en 1999 por los Estados Unidos. El principal problema radica en su presencia en las aguas subterráneas debido al lento proceso de degradación biológica.

3.8 SIMULACIÓN DE PROCESOS

La simulación de procesos químicos ha nacido de la búsqueda de alternativas que permitan afrontar retos como el ahorro y la optimización de la energía, una nueva cultura que piensa diferente sobre el medio ambiente y que busca un uso más racionalizado de los combustibles (García González, 2008).

El desarrollo de simuladores de procesos crece de manera muy acelerada, debido a que va de la mano con el desarrollo tecnológico, que día a día trabaja en brindar procesadores más veloces, con capacidad de almacenamiento mayor, con lenguajes de programación más organizados. Por otro lado se ha trabajado el cálculo de propiedades, mediante métodos numéricos, logrando que cada vez se acerquen más los resultados de la simulación a los resultados experimentales.

Los simuladores se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Según el cambio de las propiedades con el tiempo, los simuladores se pueden clasificar en estacionarios (las propiedades no varían con el tiempo) y dinámicos (las propiedades varían con el tiempo).
- Según su uso se pueden clasificar en específicos (elaborados para una operación unitaria específica) como por ejemplo Madsed, Reformación, entre otros. Por otro lado se encuentran los simuladores de uso general, los cuales relacionan varias operaciones unitarias entre sí para simular un proceso. Los más conocidos son Hysys, Aspen, Chemcad, y PRO II (García González, 2008).

Aspen Hysys es tal vez el simulador más usado por la industria petrolera, ya que desde su concepción se ha creado con ese fin. Cuenta con una gran variedad de paquetes termodinámicos de fluidos dentro de los que se destacan Non-Random Two Liquid (NRTL), Soave-Redlich-Kwong (SRK), Lee Kesler, pero en el área de hidrocarburos el más usado es Peng Robinson (PR) (ASPEN TECH, 2015).

4. METODOLOGÍA

Este trabajo se divide en 5 etapas tal como se puede apreciar abajo en la figura 11.

- a) En la primera parte se llevó a cabo una completa revisión bibliográfica buscando tener los conocimientos básicos necesarios para el desarrollo de la tesis.
- b) La segunda etapa consta de la recopilación de los datos necesarios para su evaluación, que van desde los datos de diseño, pasando por los operacionales, hasta llegar a las pruebas de laboratorio para el análisis de los parámetros obtenidos según la regla de mezcla nafta craqueada/alquilato total.
- c) En la tercera etapa se simuló el estado actual de operación de la torre T-4565 (re-run) como base para las siguientes etapas y se validó la simulación utilizando los datos operacionales recopilados.
- d) Luego de haber simulado y validado el estado de operación actual de la torre se procede a evaluar el comportamiento de la simulación y los resultados obtenidos variando las reglas de mezclas entre el alquilato total y la nafta craqueada (Alternativa 1), hasta incorporar un total del 100% de nafta craqueada como alimento a la torre (Alternativa 2).
- e) Por último, se procede a hacer un análisis económico y la determinación de la viabilidad del proyecto.

4.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Con el propósito de cumplir con los objetivos planteados, se hace necesaria una revisión y análisis de los aspectos bibliográficos más relevantes en temas relacionados con la obtención del alquilato, el uso de la nafta craqueada para su

producción, así como con los parámetros de calidad del combustible, su uso y comercialización en el mercado internacional. Para ello se realizó una búsqueda bibliográfica en bases de datos, libros especializados, reportes de la empresa, etc.

Figura 11 Diagrama de bloques de la metodología



4.2 RECOPIACIÓN DE DATOS

En esta etapa se recopilaron los datos históricos existentes de la operación de la torre de rectificación de alquilato liviano T-4565 (re-run), así como los datos de caracterización fisico-químicas del alquilato total, el alquilato liviano y la nafta craqueada.

4.2.1 Datos de la nafta craqueada

El aprovechamiento de la nafta craqueada es el objetivo principal de este proyecto, conocer su composición es un factor determinante para llevar a cabo el desarrollo de la simulación obteniendo información precisa de los compuestos presentes en cada una de las corrientes que intervienen en el proceso debido a que su composición depende de las propiedades del crudo procesado para su

obtención, razón por la cual se le realizaron pruebas como curvas de destilación, número de octano de investigación (RON), presión de vapor reid (RVP) y la composición de azufre, inicialmente se estableció el potencial de la nafta craqueada procesando 30 muestras y se comparó con los datos de la curva de destilación del alquilato total, los resultados se muestran en el Anexo A. Sin embargo este solo análisis químico no es suficiente y se hace necesario complementarlo, para lo cual se realizó una análisis especial denominado PIANO de acuerdo a la norma ASTM D-6729, que consiste en la caracterización química de los componentes agrupándolos por familia de hidrocarburos como parafinas, isoparafinas, aromáticos, naftenos y olefinas.

Las normas que rigen la determinación de estas propiedades se presentan a continuación en la tabla 2:

Tabla 2 Normas ensayos ASTM

| PROPIEDAD | NORMA UTILIZADA |
|------------------------------|-----------------|
| CURVAS DE DESTILACIÓN | ASTM D-86 |
| RESEARCH OCTANE NUMBER (RON) | ASTM D-2699 |
| REID VAPOR PRESSURE (RVP) | ASTM D-323 |
| AZUFRE | ASTM D-2622 |
| PIANO | ASTM D-6729 |

La realización de todos los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo con la colaboración del Laboratorio Industrial certificado de Ecopetrol S.A. en sus instalaciones ubicadas en la ciudad de Barrancabermeja.

4.2.2 Datos del alquilato

El estudio de la corriente de alquilato (total, liviano y pesado) es de vital importancia, debido a que a partir de su análisis se definen los parámetros base, para conocer el aprovechamiento de la nafta craqueada.

Debido a que la torre T-4565 (re-run) opera actualmente únicamente con alquilato como materia prima, fue necesario realizar muestreos en las corrientes de alquilato total y alquilato liviano, por dos motivos: primero para validar el modelo que se realizó en el software Aspen Hysys y segundo para buscar la simulación que más se ajuste al comportamiento real de la torre. Dentro de los análisis de muestras fue necesario realizar pruebas de curvas de destilación, número de octano de investigación (RON) y presión de vapor reid (RVP) de cada muestra de acuerdo a las normas especificadas en la tabla 1.

Al realizar los procesos de mezclado fue necesario conocer la composición de los principales grupos de compuestos en el alquilato, por lo tanto se determinó su composición mediante el análisis denominado PIANO de acuerdo a la norma ASTM D-6729.

Estas tareas se llevaron a cabo con el apoyo del Laboratorio Industrial certificado con el que cuenta Ecopetrol S.A.

4.2.3 Parámetros de diseño y operación de la torre rectificadora de alquilato (T-4565)

Para el desarrollo de la simulación se ingresaron los datos de diseño y operación de la torre T-4565 manteniendo las mismas condiciones de operación en el ambiente de simulación.

- **Parámetros de diseño:** Son todos aquellos parámetros con los que fue construida la torre. Dentro de los parámetros de diseño se encuentran el diámetro de la torre, la altura de la torre, el número de platos, el tipo de platos, el tipo de condensador, el tipo de rehervidor, etc.
- **Parámetros de operación:** Los parámetros de operación se dividen en dos: parámetros de operación fijos y parámetros de operación variables.

Dentro del grupo de los parámetros de operación que permanecerán constantes se encuentran la caída de presión de los platos, del rehervidor E-4583 y del condensador E-4587A/B.

Por otro lado se encuentran los parámetros de operación variable, como lo son; el flujo de entrada de alquilato total a la torre, la temperatura de entrada a la torre, las temperaturas de los platos, la presión del condensador, el reflujo y por último los flujos de salida: alquilato liviano y alquilato pesado. Esta recopilación de datos se realizó utilizando la herramienta para captura de datos sistemática PI de la base de datos de Ecopetrol S.A, tomando como referencia la fecha del muestreo. En total se hicieron 18 muestreos en un periodo de dos meses comprendidos entre junio y julio de 2015, 9 de los cuales corresponden a la corriente de entrada (alquilato total) y las otras 9 a la corriente de tope (alquilato liviano). Por otro lado se tomaron en cuenta los datos reportados el 10 de julio de 2011 donde se tomaron los muestreos realizados, los cuales corresponden a cada una de las corrientes involucradas en la torre.

4.2.4 Datos para cálculos económicos

4.2.4.1 Alternativa 1: Al realizar un estudio preliminar del comportamiento de los precios por barril del Avgas y la nafta craqueada, se determinó que el primero presenta un costo en el mercado superior a la nafta craqueada, manteniendo un beneficio de USD\$30/barril aproximadamente. Esto determina la viabilidad bruta del mezclado de estas corrientes, pero es necesario tener en cuenta otros factores importantes, motivo por el cual se recopiló información histórica para llevar a cabo su evaluación, como por ejemplo el precio y el volumen de producción de Avgas y nafta craqueada en los últimos tres años.

El cálculo de la inversión necesaria se determinó partiendo de los costos para direccionar el flujo de nafta craqueada hacia la corriente de alimentación de la

torre T-4565: tubería, válvulas, accesorios y talento humano entre otros. Esta inversión se vio favorecida por una tubería ya existente actualmente fuera de servicio.

4.2.4.2 Alternativa 2: el estudio económico se realizó teniendo en cuenta como factor limitante la calidad de la nafta craqueada liviana. Actualmente la legislación colombiana exige que las gasolinas contengan un máximo de 300 ppm de azufre. La unidad de craqueo catalítico UOP II (Universal Oil Petroleum) actualmente produce gasolina que contiene alrededor de 800 ppm, motivo por el cual se realizan diversas mezclas con gasolinas importadas con un contenido inferior de azufre con un costo superior para alcanzar los parámetros que exige la ley.

Debido a este panorama para hacer el cálculo económico se tomaron los valores históricos de la nafta craqueada en el mercado para una concentración de azufre de 800 ppm como materia prima, y con una concentración de 300 ppm para el producto, estableciendo así el potencial existente de esta alternativa.

La implementación de esta alternativa, presenta exactamente la misma inversión que la alternativa anterior, debido a que los costos de conexión son los mismos.

4.3 SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS EN OPERACIÓN HABITUAL DE LA UNIDAD

4.3.1 Montaje de la simulación en el software Aspen Hysys

La simulación y validación de los datos en operación actual de la torre de rectificación de alquilato (T-4565) es la base de la cual se partió para estudiar el aprovechamiento de la nafta craqueada, su realización (diseño básico) se apoyó con un trabajo de pregrado (Pérez y Santamaría, 2015).

Para la simulación de este equipo se usó el software Aspen Hysys, seleccionando como paquete de fluidos Peng Robinson. Dado que el alquilato es una mezcla de parafinas, isoparafinas, aromáticos, naftenos y olefinas, manejar cada uno de los compuestos de estos grupos presentes es poco práctico, y además costoso desde el punto de vista de los procedimientos de laboratorio necesarios para obtener los datos para la simulación. Debido a que el software Aspen cuenta con una herramienta denominada OIL MANAGER, permite crear pseudocomponentes ingresando datos como curvas de destilación, curvas de peso molecular, composición de livianos, entre otros. En este caso particular se usarán las curvas de destilación ASTM D-86 para la creación de los componentes hipotéticos debido a que es el procedimiento usado en los laboratorios de Ecopetrol. Por otro lado se incluyó la composición de los denominados light ends como lo son; metano, etano, propano y butano; factores importantes en la determinación de la presión de vapor Reid (RVP).

En el software Aspen Hysys, se realizó el caso base, partiendo de una torre de destilación de platos, con una única alimentación (Alquilato Total) y dos corrientes de salida: la corriente de cima (Alquilato Liviano) y la corriente de fondo (Alquilato Pesado). Las condiciones de diseño de la torre se presentan en el Anexo B.

4.3.2 Validación de los datos obtenidos mediante la simulación

Para verificar que la simulación realizada fue correcta, se tomaron algunos parámetros experimentales en la corriente de alquilato liviano y se compararon con los obtenidos por medio del software. Los parámetros que se escogieron para validar dicha simulación fueron las curvas de destilación ASTM D-86, RON (Research Octane Number) y RVP (Reid Vapor Pressure).

Las curvas de destilación ASTM D-86 se validaron mediante el coeficiente de determinación (R^2), el cual es una herramienta estadística que se usa para determinar la calidad de un modelo, en este caso una simulación, para ajustar y predecir los resultados experimentales, además de dar a conocer la proporción de

variación de los resultados. Una buena predicción es aquella que presenta valores cercanos a 1.

Se validaron cada una de las 9 simulaciones, de acuerdo a la siguiente expresión matemática (Mendoza Rivera & Bautista M, 2015):

$$R^2 = \frac{\sum i(y_{i \text{ Experimental}} - y_{i \text{ Simulado}})^2}{\sum i(y_{i \text{ Simulado}} - \bar{y}_{\text{Experimental}})^2} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$y_{i \text{ Experimental}}$ = es el valor que reporta el laboratorio para el punto i.

$y_{i \text{ Simulado}}$ = es el valor que reporta el software en la simulación para el punto i.

$\bar{y}_{\text{Experimental}}$ = es el promedio de la sumatoria de todos los puntos experimentales.

El error relativo porcentual, fue el método utilizado para validar curvas de destilación, RON y RVP, el cual es considerado como un buen indicador de la precisión y es independiente de la escala usada. Se utiliza como criterio de calidad de un resultado, fijándose que si su valor es menor que el 1% el resultado es muy bueno, en cambio si el valor se encuentra en el intervalo del 5% al 10% el resultado es aceptable, mientras que si dicho valor supera el 10% el resultado obtenido es poco fiable (Santo & Lucumberry, 2005). A continuación se presenta la expresión matemática:

$$e_r \% = \frac{|x_{\text{Experimental}} - x_{\text{Simulado}}|}{x_{\text{Experimental}}} \times 100\% \quad \text{Ecuación 4}$$

4.3.3 Cálculo del RON y del MON

El valor que se obtiene para estas propiedades mediante la simulación en Aspen Hysys no presenta valores cercanos a los valores reales. Para mejorar la predicción del RON se utilizó el método desarrollado por Tareq Albahri, el cual se basa en la contribución del grupo estructural. Para la predicción de la corriente de Alquilate total se calculó el RON de 64 compuestos, y se obtuvo el octanaje total de la mezcla multiplicando el RON de cada compuesto (RON_i) con el porcentaje

en volumen del compuesto dentro de la mezcla (%Volumen_i) (Albahri, 2002) La ecuación se resume en la siguiente expresión:

$$RON = \sum RON_i * \%Volumen_i \quad \text{Ecuación 5}$$

Una vez finalizado el análisis del RON se procedió a calcular el número de octano MON, el cual fue determinado a partir de una ecuación propuesta por Albahri, donde relaciona el MON con el número de octano RON y la gravedad específica (SG) de la corriente analizada. La ecuación usada para calcular el MON se presenta a continuación:

$$MON = 22.5 + 0.83 * RON - 20 * SG \quad \text{Ecuación 6}$$

4.4 INCORPORACIÓN DE LA CORRIENTE DE NAFTA CRAQUEADA A LA TORRE T-4565 DE ACUERDO A LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA REGLA DE MEZCLA ALQUILATO-NAFTA

4.4.1 Simulación incorporando nafta craqueada

Buscando obtener los mejores resultados, se eligió la simulación que presentó mayor coeficiente de determinación (R^2) y menor error relativo porcentual ($e_r\%$). A dicha simulación se le incorporó una nueva corriente, nafta craqueada, la cual se mezcla con el alquilato total en un mezclador para dar origen a la nueva corriente de alimentación a la torre T-4565.

Se realizaron 5 mezclas alquilato total nafta craqueada en relaciones volumétricas de 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de nafta craqueada por volumen de alimentación con alquilato de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\%_{Mezcla} = \frac{Q_{Nafta\ craqueada}}{Q_{Nafta\ craqueada} + Q_{Alquilato\ total}} \times 100\% \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$Q_{Nafta\ craqueada}$ = caudal de nafta craqueada que entra al mezclador

$Q_{Alquilato\ total}$ = caudal de alquilato total que entra al mezclador

Debido a que la nafta craqueada presenta algunos componentes de menor peso molecular que el alquilato total, al realizar cada una de las mezclas cambia la composición de la corriente de alimentación, por este motivo fue necesario especificar el nuevo flujo de alquilato liviano que sale de la torre de destilación T-4565 para satisfacer los grados de libertad de la simulación, para lo cual se tomó como referencia el porcentaje de aprovechamiento promedio de la torre, es decir, la relación existente entre el caudal de entrada con el caudal recuperado como producto de cima, el cual se sitúa alrededor del 85% de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\%_{ap} = \frac{Q_{Cima}}{Q_{Alimentación}} \times 100\% \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

Q_{cima} = caudal de Alquilato Liviano Producto

$Q_{Alimentación}$ = caudal que sale del mezclador

$\%_{ap}$ = % de aprovechamiento

Al definir el flujo de salida de alquilato liviano, también fue necesario definir el reflujo con el cual opera la torre. Para esto se determinó la razón de reflujo relacionando la corriente de salida de alquilato liviano con la de reflujo de la torre del caso base elegida para realizar las mezclas.

Las demás condiciones de operación con las cuales se simuló la torre, son las mismas que las utilizadas para el desarrollo de la simulación anterior escogida.

4.4.2 Determinación de propiedades de las mezclas

La determinación de las propiedades de la mezcla de alquilato total con nafta craqueada establece el límite de mezclado y el potencial económico que se puede aprovechar en la alternativa 1. Las propiedades que se establecieron como parámetros limitantes son las curvas de destilación, el contenido de azufre, el octanaje de la gasolina de aviación (Avgas) y la presión de vapor Reid (RVP). Partiendo de la simulación de las mezclas, se determinaron las curvas ASTM D-86, el RVP y el número de octano de investigación (RON); el cual fue necesario para el cálculo del octanaje. El cálculo del contenido de azufre se realizó mediante simulación, teniendo como base el análisis de los distintos componentes presentes en la corriente de nafta craqueada, la cual fue suministrada por el laboratorio de Ecopetrol S.A.

4.4.3 Determinación teórica de la adición de Tetraetilo de plomo

El alquilato liviano presenta un octanaje inferior al requerido para comercializarse como Avgas (100/130) debido a que alcanza valores en promedio de 95 octanos, motivo por el cual se le adiciona tetraetilo de plomo (TEL) para cumplir con las especificaciones requeridas.

Al realizar la mezcla entre el alquilato total y la nafta craqueada, el número de octano en el Alquilato Liviano producto disminuye ligeramente y por lo tanto se requiere calcular la cantidad a adicionar de este compuesto. Para calcular la cantidad de TEL a adicionar para llevar el octanaje del Alquilato Liviano producto hasta los 130 de octanaje requeridos como Avgas, primero se le restan a 130 (octanaje objetivo) el octanaje alcanzado inicialmente por la corriente de cima (Octanaje del Alquilato Liviano). En segunda medida se llevó a cabo una

corrección por azufre debido a que afecta la susceptibilidad al TEL en alrededor de un punto (Cerutti, 2001). Los compuestos azufrados más perjudiciales para tal efecto son los mercaptanos, disulfuros y el azufre libre mientras los tiofenos no perjudican tanto el efecto del TEL, siendo estos últimos los que priman en el proceso. En tercer lugar los métodos de cálculo del RON y del MON presentan un error de 2% (Albahri, 2002), por lo tanto se calculó una compensación multiplicando las unidades necesarias para alcanzar el valor de del octanaje objetivo (130) por 2%. Posteriormente, se sumaron los tres factores y se obtiene el número total de unidades para alcanzar 130. Los pasos anteriores se resumen con la siguiente ecuación:

$$N.O = [((130 - OAL) \times 0.02) + ((130 - OAL) + 1)] + 100 \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

N.O = Número de Octano

OAL = Octanaje del Alquilate Liviano

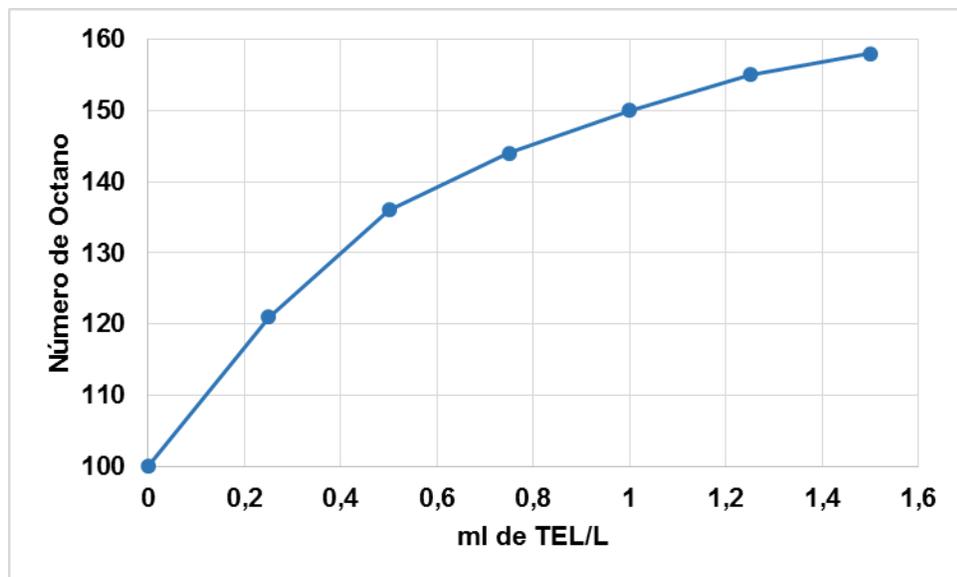
Por último se realizó la determinación de TEL a adicionar con el valor de número de octano obtenido utilizando la figura 12.

4.5 INCORPORACIÓN DE LA CORRIENTE DE NAFTA CRAQUEADA EN EL CASO BASE Y VERIFICACIÓN DE LAS CORRIENTES DE SALIDA

Una vez desarrollado el caso base, logrando un buen aproximamiento al comportamiento real de operación, se realizó la simulación de la torre T-4565, alimentando al proceso únicamente nafta craqueada. Se varió el porcentaje de aprovechamiento, es decir, la relación entre el flujo de alquilate liviano y la corriente de alimentación de la torre, modificando el flujo de destilado y el reflujo, buscando obtener una concentración de azufre inferior a 300 ppm. El flujo de

alimentación que se tomó para realizar la simulación fue el caudal de diseño (2000 BPD). Para determinar el porcentaje de aprovechamiento (relación alquilato liviano/nafta craqueada v/v) que cumple con el parámetro establecido se realizó un estudio de caso, variando el porcentaje de aprovechamiento desde 80% hasta 40% en intervalos de 5%, para luego crear un modelo que representa el comportamiento del azufre en función de este porcentaje.

Figura 12 Adición de tetraetilo de plomo (TEL) para alcanzar Números de Octano superiores a 100



Fuente: Cerutti, 2001

4.6 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para determinar la viabilidad de las alternativas se calcularon los ingresos dejados de percibir en los últimos 4 años, junto a una evaluación a futuro usando como parámetros beneficio costo (B/C), valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR).

Para esto, se recopilaron los precios históricos de las corrientes involucradas en el transcurso de los últimos 4 años para determinar los ingresos dejados de percibir.

Se determinó la inversión necesaria para implementar cada una de las alternativas propuestas teniendo en cuenta los recursos físicos y el talento humano para el desarrollo total de estas.

Se definieron los costos asociados a cada proceso; para la alternativa 1 se calculó la cantidad de TEL que se debe adicionar para que el alquilato liviano alcance el octanaje de 130 como parámetro requerido para la preparación de Avgas, la longitud de la tubería requerida para ensamblar el trazado total para su implementación, los accesorios necesarios, la mano de obra, herramientas y/o materiales requeridos, entre otros que se detallarán en la discusión de resultados del capítulo 5 en la evaluación económica.

Para la alternativa 2 se determinaron los costos de personal, mantenimiento, energía eléctrica, insumos y servicios industriales asociados al proceso, estos últimos no se incluyeron en la alternativa 1 debido a que están inmersos en su operación normal así opere solo con alquilato total, en cambio en la alternativa 2 la torre inicialmente está fuera de servicio y por ende se incluyen los costos de operación para ponerla en servicio.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 RECOPIACIÓN DE DATOS

5.1.1 Datos del alquilato

La recopilación de los datos de curvas de destilación ASTM D-86, número de octano de investigación (RON) y presión de vapor reid (RVP) tanto para el alquilato total como para el alquilato liviano se realizaron aleatoriamente en el transcurso de los meses de junio y julio de 2015, en donde se tomaron un total de 9 muestras. Un resumen de los resultados reportados por el laboratorio se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3 Resumen de los resultados de laboratorio para alquilato total y alquilato liviano

| Componente | Unidad | Alquilato Total Datos | Alquilato Liviano Datos |
|-----------------------------|--------|--------------------------|----------------------------|
| Punto inicial de ebullición | °F | 92,6 ± 8,9 | 97,4 ± 1,4 |
| 10% vol evaporado | °F | 155,7 ± 3,8 | 153,7 ± 4,27 |
| 40% vol evaporado | °F | 213,8 ± 2,0 | 208,4 ± 2,7 |
| 50% vol evaporado | °F | 220,7 ± 1,3 | 214,9 ± 2,0 |
| 70% vol evaporado | °F | 229,3 ± 1,1 | NR |
| 80% vol evaporado | °F | 250,3 ± 3,9 | NR |
| 90% vol evaporado | °F | 284,2 ± 4,7 | 229,9 ± 1,4 |
| Punto final de ebullición | °F | 438,0 ± 7,8 | 263,5 ± 3,7 |
| Presión de vapor Reid | psi | 6,55 ± 1,25 | 6,84 ± 0,22 |
| Research Octane Number | - | 94,7 ± 0,4 | 94,6 ± 0,4 |

Fuente: Pérez y Santamaría, 2015

5.1.2 Datos de operación de la torre rectificadora de alquilato (T-4565)

Los datos de operación de la torre rectificadora de alquilato (T-4565) se recopilaron a partir de la base de datos entre los meses de junio y julio de 2015, se tomaron teniendo como base los días en que se llevó a cabo la toma de las muestras los cuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4 Datos de operación de la T-4565 (re-run)

| Unidad | Parámetro | NÚMERO DE DATO DE OPERACIÓN | | | | | | | | |
|------------|-------------------------|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 03-jun | 03-jun | 20-jun | 16-jul | 22-jul | 24-jul | 25-jul | 26-jul | 27-jul |
| Barril/día | Flujo Alquilato Total | 1719,5 | 1719,5 | 1337,0 | 1600,0 | 1299,9 | 1719,0 | 1471,0 | 1267,0 | 1196,0 |
| °F | Temperatura de entrada | 183,9 | 183,9 | 178,3 | 178,6 | 170,8 | 183,9 | 176,8 | 175,1 | 167,7 |
| °F | Temperatura plato 20 | 388,3 | 388,3 | 400,7 | 381,1 | 385,3 | 388,3 | 392,7 | 400 | 387,5 |
| °F | Temperatura plato 18 | 261,8 | 261,8 | 292 | 260,1 | 224,3 | 261,8 | 284,3 | 293,8 | 234,8 |
| °F | Temperatura plato 1 | 188,2 | 188,2 | 178,8 | 183,2 | 175 | 188,2 | 184,3 | 179,2 | 171,8 |
| °F | Temperatura salida | 99,8 | 99,8 | 99 | 103,5 | 97,6 | 99,8 | 149,6 | 149,8 | 146,9 |
| psia | Presión Condensador | 9,3 | 9,3 | 7,5 | 7,7 | 7,5 | 9,3 | 7,53 | 7,7 | 7,53 |
| Barril/día | Reflujo | 377,7 | 377,7 | 284,9 | 289,1 | 288,9 | 377,7 | 284 | 281,8 | 291,5 |
| Barril/día | Flujo Alquilato Liviano | 1516,9 | 1516,9 | 1143,5 | 1351,5 | 1097,8 | 1516,9 | 1247 | 1075 | 1015 |
| % | % de fraccionamiento | 88 | 88 | 86 | 84 | 84 | 88 | 85 | 85 | 85 |

5.1.3 Datos de la nafta craqueada

Dentro de las muestras analizadas mediante el ensayo ASTM D-86 para la nafta craqueada se obtuvieron los siguientes datos donde se resumen los cortes típicos de esta corriente:

Tabla 5 Datos curva de destilación ASTM D-86 para la nafta craqueada

| Corte | Dato | Corte | Dato |
|---------|----------|----------|----------|
| 0% vol | 94,8 °F | 50% vol | 203,9 °F |
| 1% vol | 99,1 °F | 60% vol | 233,5 °F |
| 5% vol | 112,1 °F | 70% vol | 264,9 °F |
| 10% vol | 121,1 °F | 80% vol | 303,2 °F |
| 20% vol | 136 °F | 90% vol | 349,8 °F |
| 30% vol | 153,2 °F | 95% vol | 377,7 °F |
| 40% vol | 175,8 °F | 100% vol | 397,6 °F |

La presencia de azufre en los combustibles es un factor de calidad muy importante, motivo por el cual se analizó su composición y para ello se realizó una prueba cromatográfica. El grupo de compuestos azufrados que prima en la nafta craqueada es el grupo de los tiofenos. Los valores reportados se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6 Compuestos azufrados presentes en la nafta craqueada

| COMPUESTO | ppm | COMPUESTO | ppm |
|-------------------|--------|--------------|-------|
| 5-Mbenzothiophene | 5,00 | t-B-Mercapta | 5,19 |
| 2-Mbenzothiophene | 6,85 | diE-Sulphide | 7,87 |
| TM-Thiophene | 136,99 | Thiolane | 11,02 |
| 2-Bromothiophene | 42,33 | Thiophene | 68,27 |
| 7-Mbenzothiophene | 5,46 | 3MThiophene | 70,40 |
| 6-Mbenzothiophene | 6,02 | diM-Sulphide | 1,85 |
| H ₂ S | 1,39 | 2MThiophene | 61,04 |
| TetraM-Thiophene | 197,39 | 1Hexanethiol | 4,08 |
| COS | 10,19 | ThioNaphtene | 17,41 |
| CS ₂ | 1,85 | P-Sulphide | 68,17 |
| E-Mercaptan | 2,41 | B-Sulphide | 6,48 |

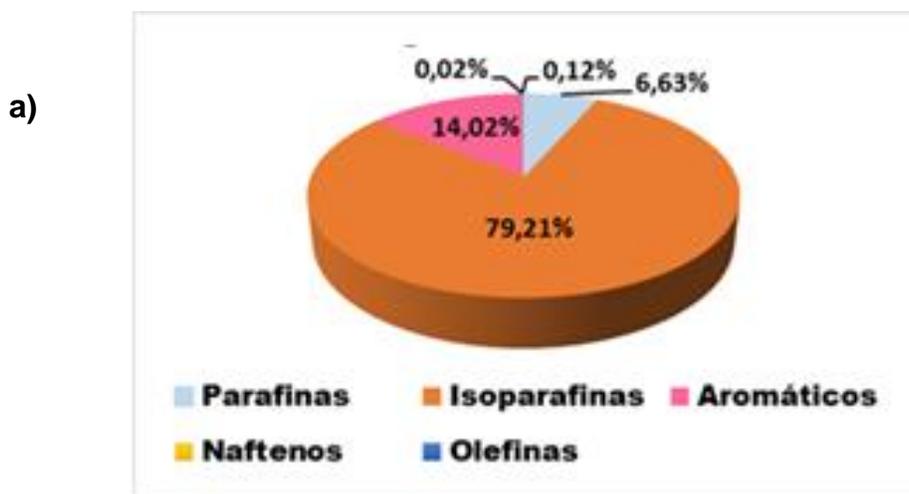
5.1.4 Composición del alquilato total y el alquilato liviano

Al realizar el mezclado de las materias primas es muy importante conocer la composición de las mezclas para determinar las nuevas propiedades de la misma. Para ello se realizaron pruebas cromatográficas donde se reportan las parafinas, isoparafinas, aromáticos, naftenos, olefinas y otros compuestos no identificados; dicha prueba se denomina PIANO. Esta prueba se realizó tanto para el alquilato total como para la nafta craqueada, los resultados se presentan en la figura 13.

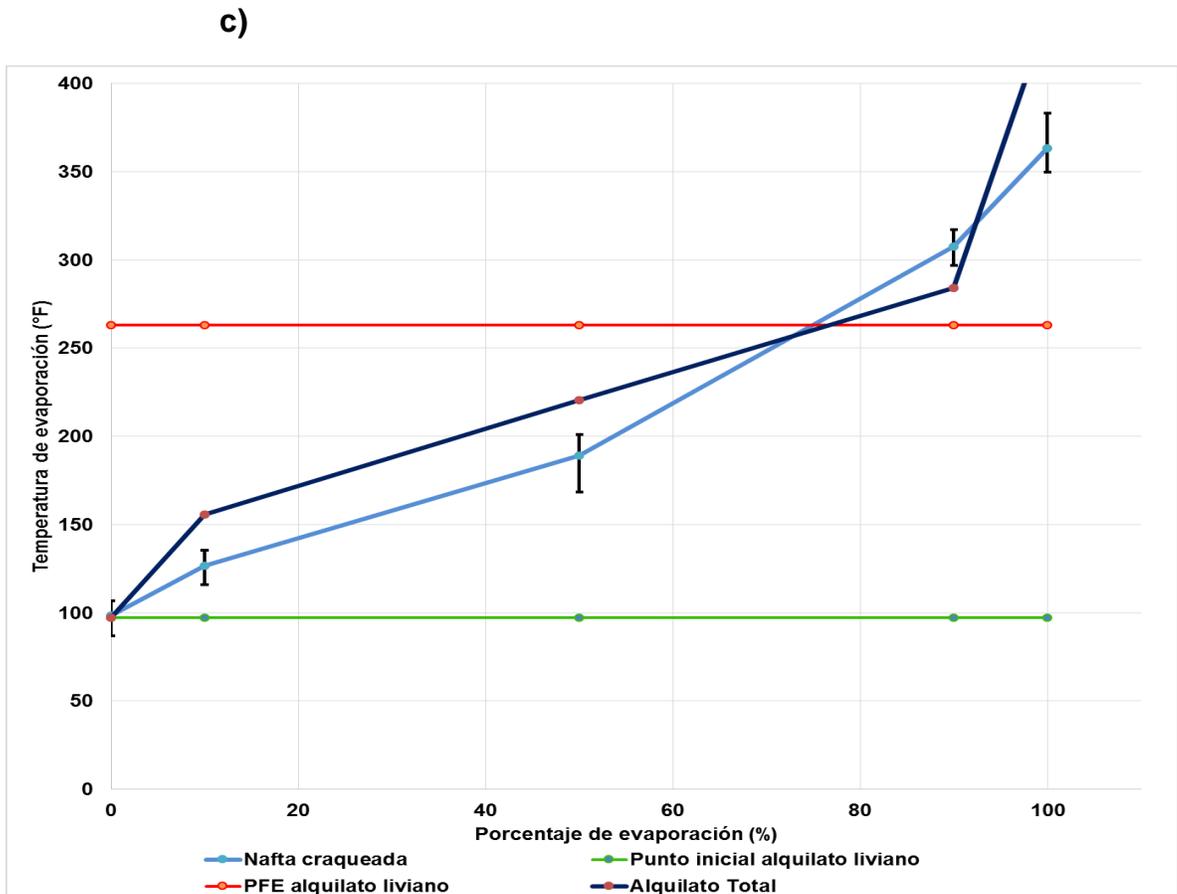
Como puede observarse en la figura 13 (literal a), en la composición de la corriente de alquilato total priman las isoparafinas con un 79.21% del total del contenido, mientras que la nafta craqueada (literal b) en su mayoría es olefínico. Este panorama da a entender que la composición de las dos corrientes son muy

diferentes, y que usar nafta craqueada como sustituto parcial del alquilato total en principio no es posible, pero en realidad cuando ocurre la mezcla, la variación de la composición parece favorecer los resultados esperados al incrementar su similitud con la composición del Alquilato Total, se observa en el literal (c) en las curvas de destilación ASTM D-86 de la nafta craqueada el potencial de sus propiedades en comparación con las del Alquilato total para la obtención del Alquilato de acuerdo al volumen evaporado entre los rangos de la temperatura inicial de ebullición del Alquilato Liviano y su punto final de ebullición (PFE) el cual fue fundamental para impulsar el desarrollo del análisis de la propuesta.

Figura 13 Características que señalan la posible incorporación de nafta craqueada a la corriente de alquilato total: (a) PIANO alquilato total (b) PIANO nafta craqueada (c) Curva de destilación nafta craqueada Vs alquilato total



APROVECHAMIENTO DE NAFTA CRAQUEADA UTILIZANDO LA CAPACIDAD INSTALADA DE LA T-4565 EN LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA

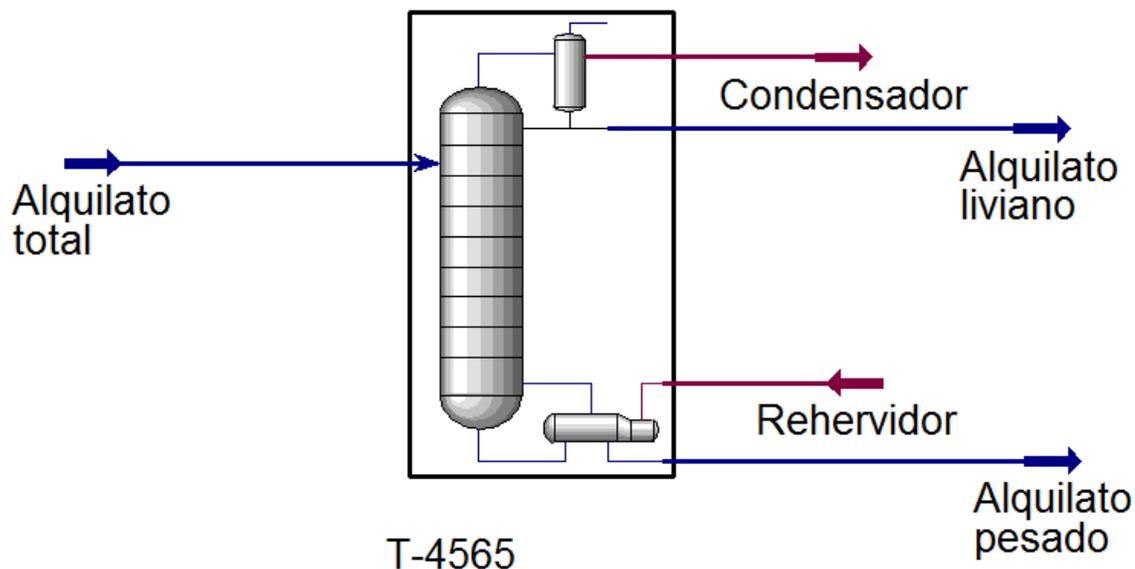


5.2 SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN DE DATOS EN OPERACIÓN HABITUAL DE LA UNIDAD

La simulación del estado de operación actual de la torre de rectificación de alquilato (T-4565 re-run) se realizó de acuerdo al montaje PFD presentado en la figura 14. Este diagrama consta de una torre de destilación de platos a la cual ingresa una corriente de entrada (Alquilato Total únicamente) y presenta dos corrientes de salida: Alquilato Liviano (cima) y Alquilato Pesado (fondo).

Una vez instalada la torre, se procedieron a insertar los datos de diseño, es decir las variables fijas de operación de la torre para tener el montaje base para el análisis de los datos suministrados por el laboratorio. Se tomó como base las simulaciones realizadas por Pérez y Santamaría, en donde utilizando la herramienta denominada OIL MANAGER, y las curvas de destilación ASTM D-86 del Alquilato total se crearon los componentes hipotéticos para cada caso.

Figura 14 Montaje de la torre rectificadora de Alquilate T-4565 en el software Aspen Hysys



Con el fin de validar los resultados obtenidos mediante la simulación, se procesaron los datos obtenidos en la corriente de alquilato liviano y se compararon con los datos suministrados por el laboratorio, determinando el error relativo porcentual para cada uno de los cortes de destilación ($e_r\%$) y el coeficiente de determinación (R^2) para cada una de las muestras. Los resultados se presentan en la Tabla 7. Los cálculos realizados se resumen en el Anexo C.

Al analizar los resultados obtenidos, se observa que el mayor error relativo porcentual ($e_r\%$) se presenta en el punto inicial de ebullición, que aunque en promedio presenta un valor que se encuentra en el rango comprendido entre 5% y 10% el cual es considerado como un valor aceptable según la literatura, algunas muestras presentan valores que superan el 10%. Estos valores pueden presentarse debido a posibles errores de muestreo porque en este corte se definen los componentes más volátiles presentes en el alquilato. Los demás cortes

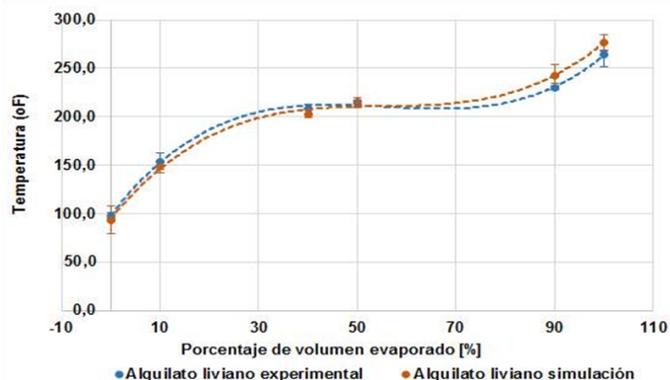
analizados presentan mayor precisión, ya que sus valores promedio se encuentran en un rango que oscila entre 1% y 5%. (Santo & Lucumberry, 2005)

Tabla 7 Validación de datos en operación habitual de la torre T-4565 (re-run) con alquilato total como alimentación.

| Componente | Factor de validación | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | Promedio |
|---------------------------|----------------------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|----------|
| Pto inicial de ebullición | e _r % | 5,80% | 7,15% | 2,85% | 9,12% | 0,71% | 6,78% | 5,50% | 6,28% | 2,31% | 5,17% |
| 10%vol evaporado | e _r % | 7,32% | 14,80% | 3,07% | 3,89% | 6,37% | 2,54% | 1,53% | 0,33% | 7,88% | 5,30% |
| 40%vol evaporado | e _r % | 2,49% | 7,99% | 4,09% | 6,48% | 3,80% | 1,08% | 0,57% | 3,71% | 3,05% | 3,69% |
| 50%vol evaporado | e _r % | 0,53% | 2,87% | 1,36% | 2,45% | 0,83% | 0,15% | 0,86% | 3,96% | 1,51% | 1,61% |
| 90%vol evaporado | e _r % | 7,31% | 0,85% | 2,92% | 0,53% | 4,80% | 15,57% | 4,42% | 3,36% | 3,29% | 4,78% |
| Pto final de ebullición | e _r % | 4,63% | 1,35% | 0,53% | 0,42% | 0,99% | 5,34% | 5,81% | 8,33% | 3,91% | 3,48% |
| | R ² | 0,97 | 0,95 | 0,99 | 0,98 | 0,98 | 0,94 | 0,98 | 0,97 | 0,98 | 0,97 |

Teniendo en cuenta los coeficientes de determinación (R²) obtenidos, se puede concluir que la simulación presenta una muy buena predicción para calcular las curvas de destilación ASTM D-86, ya que los valores obtenidos son próximos a 1. En la Figura 15 se presenta la curva de destilación ASTM D-86 obtenida mediante la simulación junto a la curva suministrada por el laboratorio.

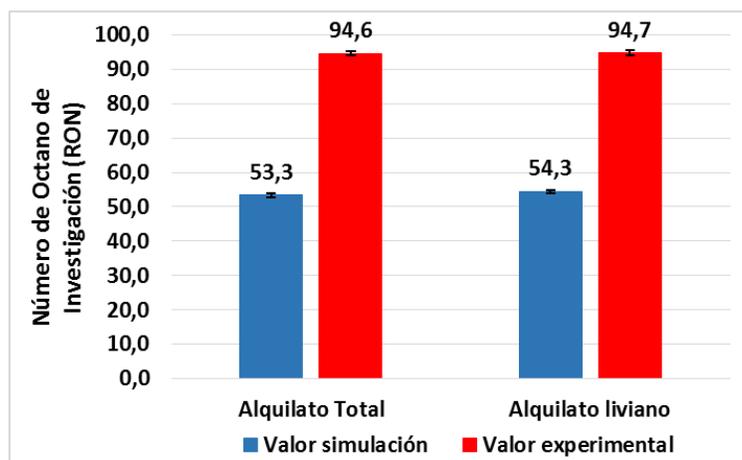
Figura 15 Curvas de destilación ASTM D-86 para el alquilato liviano producto para los datos experimentales y los obtenidos por simulación



Fuente: Pérez y Santamaría, 2015

Al simular el estado de operación habitual se encontró una gran diferencia entre el valor del número de octano de investigación (RON) reportado experimentalmente y el obtenido por medio de la simulación presentando un error de aproximadamente 43% (Pérez Montero & Santamaría Cadena, 2015), tal como se aprecia en la siguiente figura:

Figura 16 Número de octano de investigación (RON) para datos simulados y experimentales



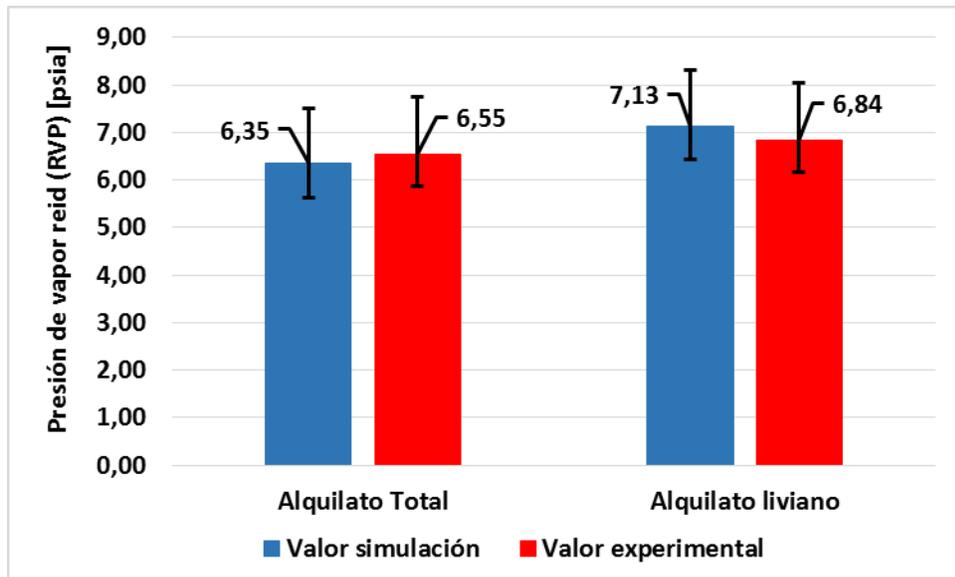
Fuente: Pérez y Santamaría, 2015

Para mejorar la predicción del RON en la corriente de alquilato total se utilizó el método desarrollado por Tareq Albahri, donde el cálculo realizado arrojó un valor de 96.85 Vs 94.6 (experimental), con un error relativo porcentual de 2.4%, lo que se traduce en una muy buena predicción.

Una vez finalizado el análisis del RON, se procedió a calcular el número de octano MON, el cual fue determinado a partir de una ecuación propuesta por Albahri, el número de octano MON para la corriente de alquilato total arrojó un valor de 89.8 Vs 94.6 (experimental), lo que representa un error relativo porcentual de 5% (Albahri, 2002), el procedimiento para realizar estos cálculos están detallados en el Anexo D.

Una vez finalizados los cálculos relacionados con el octanaje, se procedió a verificar la presión de vapor Reid (RVP) que reporta la simulación, la cual presenta un error de 4% para el alquilato total y de 5% para el alquilato liviano respecto a los valores reportados por el laboratorio de Ecopetrol S.A. Dichos valores son menores o iguales a 5% por lo que se considera como una buena predicción de este parámetro. El resumen de los datos obtenidos se presenta en la figura 17.

Figura 17 Presión de vapor Reid (RVP) para datos experimentales y simulados



5.3 INCORPORACIÓN DE LA CORRIENTE DE NAFTA CRAQUEADA A LA T-4565 Y DETERMINACIÓN DE LA REGLA DE MEZCLA ALQUILATO-NAFTA

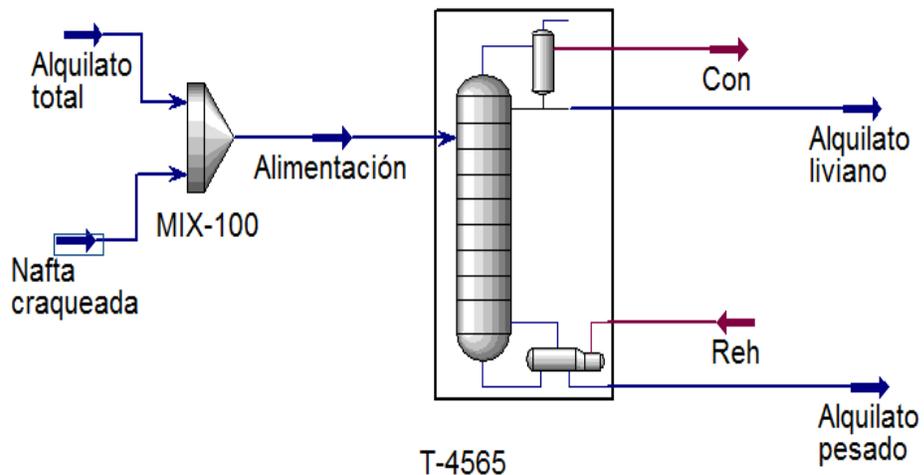
5.3.1 Simulación incorporando nafta craqueada

La determinación de la simulación del estado de operación habitual que se tomó como punto de partida para la incorporación de la nafta craqueada, se realizó teniendo en cuenta la tabla 8, buscando obtener el menor error relativo porcentual

($e_r\%$) y el mayor coeficiente de determinación (R^2). De esta manera se determinó que la simulación que presentó un comportamiento más cercano al estado de operación habitual fue la simulación número 3.

Una vez definida la simulación base, se procedió a instalar la corriente de nafta craqueada en el ambiente de simulación siguiendo los mismos pasos utilizados para instalar la corriente de alquilato total. Una vez creada esta nueva corriente se insertó un mezclador para converger las dos corrientes y así generar la nueva corriente de alimentación a la torre de rectificación de alquilato (T-4565 re-run). El montaje realizado en Aspen Hysys se presenta en la figura 18.

Figura 18 Montaje del mezclado en Aspen Hysys incorporación nafta craqueada en la alimentación



Para llevar a cabo las relaciones de mezclado fue necesario establecer los valores con los cuales opera el proceso. Para esto se determinó el flujo de nafta craqueada en relaciones volumétricas de 10%, 20%, 30%, 40% y 50%.

Además se definió el porcentaje de aprovechamiento de las mezclas (volumen de alquilato liviano/volumen de alimentación a la torre) partiendo del caso base en donde presentaba un valor de 85%. Al realizar la mezcla entre alquilato total y

nafta craqueada, las temperaturas de evaporación varían en cada corte, por lo que fue necesario establecer una temperatura que permanezca constante en el corte del 100% de evaporación en el alquilato liviano; para esto se determinó la temperatura en la corriente de alimentación que permite fraccionar el 85% en volumen de la corriente, la cual se estableció en 270°F. Esta temperatura se usó para determinar el porcentaje de aprovechamiento de cada una de las mezclas, estableciendo el porcentaje en volumen de acuerdo a la norma ASTM D-86 que se evapora a 270°F y de esta manera determinar el flujo de alquilato liviano y el reflujo hacia la torre. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 8. El Anexo E explica los cálculos realizados para obtener los resultados mencionados.

Tabla 8 Condiciones del estado de operación habitual de la T-4565 (re-run) de acuerdo a la relación de mezclado

| Componente | Unidad | Relación de mezclas | | | | |
|-------------------------|------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 10,00% | 20,00% | 30,00% | 40,00% | 50,00% |
| Alquilato total | Barril/día | 1203,3 | 1069,6 | 935,9 | 802,2 | 668,5 |
| Nafta craqueada | Barril/día | 133,7 | 267,4 | 401,1 | 534,8 | 668,5 |
| Alimentación | Barril/día | 1337,0 | 1337,0 | 1337,0 | 1337,0 | 1337,0 |
| Aprovechamiento | % | 85% | 84% | 82% | 81% | 80% |
| Flujo alquilato liviano | Barril/día | 1136 | 1123 | 1096 | 1083 | 1070 |
| Reflujo | Barril/día | 273,8 | 270,6 | 264,2 | 261,0 | 257,7 |

Una vez realizados los cálculos de las variaciones del estado de operación habitual para las relaciones de mezclado, se procedió a realizar las simulaciones, en donde se obtuvieron los resultados que se resumen en la tabla 9.

De acuerdo a los parámetros establecidos en la tabla 2, ninguna de las mezclas se ajusta a los parámetros establecidos por parte de Ecopetrol, debido a que la presión de vapor reid (RVP) está por encima del parámetro máximo permitido (7,1 psia), por lo tanto se plantea aumentar el porcentaje de aprovechamiento de cada una de las mezclas debido a que son inversamente proporcionales con la RVP, buscando ajustar la mezcla dentro de los parámetros establecidos.

Tabla 9 Curvas de destilación ASTM D-86, RVP y Números de Octano de la corriente de Alquilato Liviano obtenidos por simulación en Aspen Hysys

| Componente | Unidad | Parámetro de referencia | Relación de mezclas | | | | |
|-----------------------------|--------|-------------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 10,00% | 20,00% | 30,00% | 40,00% | 50,00% |
| Punto inicial de ebullición | °F | - | 106,0 | 104,9 | 102,6 | 101,2 | 99,4 |
| 10% vol evaporado | °F | <167 | 139,8 | 139,1 | 136,4 | 133 | 129,5 |
| 40% vol evaporado | °F | >167 | 197,3 | 196,0 | 185,7 | 184,6 | 182,6 |
| 50% vol evaporado | °F | <221 | 217,3 | 217,2 | 203,9 | 203 | 200,3 |
| 90% vol evaporado | °F | <275 | 243,4 | 244,6 | 239,5 | 242,5 | 244,4 |
| Punto final de ebullición | °F | <338 | 272,3 | 276,5 | 272,9 | 276 | 277,4 |
| 50% + 10% | °F | >275 | 357,1 | 356,3 | 340,3 | 336,0 | 329,8 |
| Presión de vapor reid (RVP) | psi | 5,5-7,1 | 7,12 | 7,42 | 7,80 | 8,12 | 8,44 |
| RON | - | - | 96,7 | 96,3 | 96,0 | 95,6 | 95,1 |
| MON | - | - | 88,8 | 88,4 | 88,2 | 87,8 | 87,4 |

Actualmente el factor que limita el incremento del porcentaje de aprovechamiento de la torre es el parámetro del porcentaje de evaporación de acuerdo a la norma ASTM D-86 del 10% en volumen el cual es sobrepasado cuando se aumenta el porcentaje de aprovechamiento que oscila alrededor del 85%. Esta limitante desaparece al mezclar el alquilato total con la nafta craqueada, debido a que la temperatura para evaporar el 10% en volumen en la corriente de alimentación disminuye con respecto a la corriente de alquilato total (alimentación caso base), por ejemplo al analizar la mezcla que presenta una relación de 80% de alquilato total y 20% de nafta craqueada, se observa que el corte presenta un cambio de 154.9°F para el alquilato total a 140.8°F en la mezcla. Esta disminución se debe a que la nafta craqueada necesita menos temperatura para evaporar el 10% del volumen, obteniendo este valor a una temperatura inferior alrededor de los 130°F.

Este panorama da vía libre para aumentar el porcentaje de aprovechamiento modificando la temperatura establecida de 270°F a 315°F, buscando mantener los porcentajes de corte de acuerdo a la norma ASTM D-86 dentro de los parámetros y de esta manera obtener viabilidad en las mezclas. Las variables que fueron modificadas para realizar las nuevas simulaciones fueron el porcentaje de aprovechamiento, el flujo de alquilato liviano y el reflujo. Los nuevos valores obtenidos se presentan a continuación:

Tabla 10 Variables a manipular para aumentar el porcentaje de aprovechamiento

| Componente | Unidad | Relación de mezclas Alquilato Vs Nafta craqueada | | | | |
|-------------------------|------------|--|---------|---------|---------|---------|
| | | 90%σ10% | 80%σ20% | 70%σ30% | 60%σ40% | 50%σ50% |
| Aprovechamiento | % | 90% | 89% | 88% | 87% | 86% |
| Flujo alquilato liviano | Barril/día | 1338 | 1486 | 1679 | 1934 | 2297 |
| Reflujo | Barril/día | 322,4 | 358,2 | 404,6 | 466,0 | 553,6 |

Una vez determinadas las variables a manipular, se procedió a realizar las nuevas simulaciones. Los datos obtenidos se resumen en la tabla 11 de los cuales se puede determinar que se logró ajustar el parámetro de la presión de vapor reid (RVP) disminuyendo su valor en todas las relaciones de mezclas, obteniendo que las relaciones de mezclado de 90%-10% y 80%-20% cumplen con los parámetros exigidos.

Tabla 11 ASTM D-86, RVP, RON y MON para el alquilato liviano de acuerdo al porcentaje de nafta craqueada en la mezcla con alquilato total

| Componente | Unidad | Parámetro de referencia | Relación de mezclas Alquilato Vs Nafta craqueada | | | | |
|-----------------------------|--------|-------------------------|--|---------|---------|---------|---------|
| | | | 90%σ10% | 80%σ20% | 70%σ30% | 60%σ40% | 50%σ50% |
| Punto inicial de ebullición | °F | Reportar | 106,5 | 105,1 | 104,1 | 102,7 | 100,7 |
| 10% vol evaporado | °F | <167 | 140,7 | 139,7 | 138,6 | 136,9 | 133,1 |
| 40% vol evaporado | °F | >167 | 206,6 | 198,5 | 197,5 | 194,4 | 185,7 |
| 50% vol evaporado | °F | <221 | 217,4 | 217,3 | 217,3 | 213 | 204,8 |
| 90% vol evaporado | °F | <275 | 253,8 | 256,7 | 259,5 | 261,3 | 263,4 |
| Punto final de ebullición | °F | <338 | 295,4 | 300,6 | 304,3 | 305 | 306,1 |
| 50% + 10% | °F | >275 | 358,1 | 357,0 | 355,9 | 349,8 | 337,9 |
| Presión de vapor reid (RVP) | psi | 5,5-7,1 | 6,81 | 7,10 | 7,39 | 7,70 | 7,99 |
| RON | - | Reportar | 96,6 | 96,2 | 95,7 | 95,3 | 95,1 |
| MON | - | Reportar | 88,7 | 88,3 | 87,7 | 87,5 | 87,4 |

Al analizar las temperaturas de evaporación de acuerdo a la norma ASTM D-86 para cada uno de los cortes, los resultados se encuentran dentro de los parámetros establecidos como referencia. Para el caso del RON y el MON no presentan variaciones significativas en los resultados obtenidos en la simulación.

5.3.2 Contenido de azufre

El azufre es un parámetro de control ambiental, el cual tiene un límite permisible en las gasolinas, donde para el caso del Avgas es de 500 ppm de acuerdo a la tabla 1.

Teniendo en cuenta que el contenido de azufrados en el alquilato total es casi nulo, solo se incorporó en la simulación cada uno de los compuestos azufrados presentes en la corriente de alimentación aportados por la nafta craqueada analizada en el laboratorio de acuerdo a la tabla 6. Mediante las simulaciones realizadas para cada una de las relaciones de mezclas se determinó el valor de los compuestos azufrados en el alquilato liviano producto de la mezcla alimentada de acuerdo a la tabla 12. Para determinar la cantidad de azufre en la corriente de alquilato liviano se tomó en cuenta el porcentaje de aprovechamiento para cada una de las mezclas establecido en la tabla 10.

Tabla 12 Contenido de azufre de la corriente de alimentación y de la corriente de alquilato liviano de acuerdo a la regla de mezclas en la T-4565

| Relación de mezclas | Unidad | Corriente de alimentación | Corriente de alquilato liviano |
|---------------------|--------|---------------------------|--------------------------------|
| 10,00% | ppm | 82,58 | 31,53 |
| 20,00% | ppm | 164,93 | 64,65 |
| 30,00% | ppm | 246,92 | 101,19 |
| 40,00% | ppm | 328,63 | 159,58 |
| 50,00% | ppm | 410,06 | 231,23 |

Se aprecia en la tabla 12 que los valores del contenido de azufre producto de la relación de mezclas son inferiores al valor máximo de azufre permitido (el cual es de 500 ppm), determinando así que el azufre no limita las mezclas. Sin embargo, es necesario conocer los compuestos azufrados presentes en la corriente de alquilato liviano, ya que estos influyen en el efecto que tiene el tetraetilo de plomo en el octanaje. De las simulaciones realizadas para las reglas de mezcla relacionadas con los compuestos azufrados, se obtuvo que los que priman son los tiofenos, siendo estos alrededor del 80% del total del azufre presente en las

corrientes. En la tabla 13 se presenta la composición simulada del azufre en las corrientes de alquilato liviano producto para las mezclas de 90%-10% y 80%-20%.

Tabla 13 Composición de compuestos azufrados en la corriente de alquilato liviano de acuerdo a la simulación

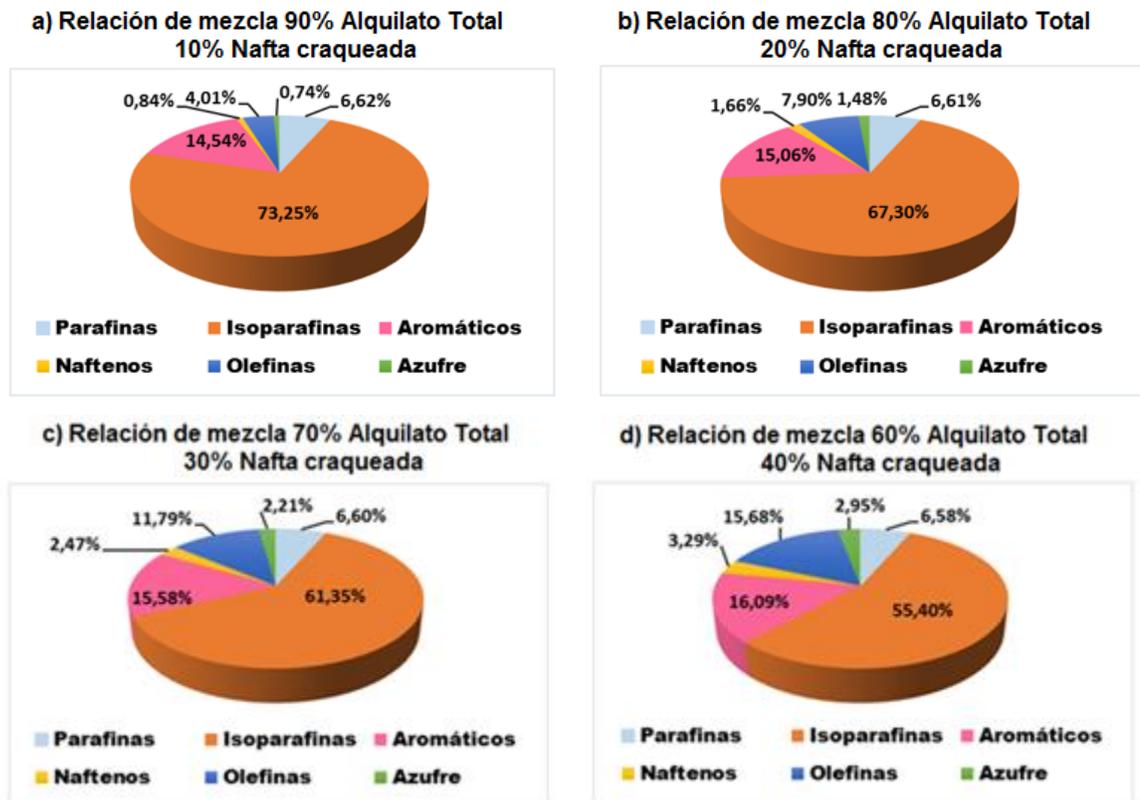
| Compuesto | Unidad | 90%-10% | 80%-20% |
|----------------------|--------|---------|---------|
| 3-Metiltiofeno | ppm | 7,68 | 15,69 |
| Tiofeno | ppm | 7,59 | 15,36 |
| 2-Metiltiofeno | ppm | 6,72 | 13,67 |
| Trimetiltiofeno | ppm | 3,61 | 7,73 |
| Tetrahidrotiofeno | ppm | 1,16 | 2,41 |
| Sulfuro de carbonilo | ppm | 1,13 | 2,29 |
| Dietildisulfuro | ppm | 0,87 | 1,77 |
| 2- Bromotiofeno | ppm | 0,67 | 1,40 |
| di-n-Propilsulfuro | ppm | 0,66 | 1,43 |
| Terbutilmercaptano | ppm | 0,58 | 1,17 |
| Etilmercaptano | ppm | 0,27 | 0,54 |
| Dimetildisulfuro | ppm | 0,21 | 0,42 |
| Disulfuro de carbono | ppm | 0,21 | 0,42 |
| Sulfuro de hidrogeno | ppm | 0,15 | 0,31 |
| n-Hexilmercaptano | ppm | 0,01 | 0,02 |
| Tetrametiltiofeno | ppm | 0,01 | 0,02 |
| di-n-Butillsulfuro | ppm | 0,00 | 0,00 |
| Benzotiofeno | ppm | 0,00 | 0,00 |
| 7-Metilbenzotiofeno | ppm | 0,00 | 0,00 |
| 6-Metilbenzotiofeno | ppm | 0,00 | 0,00 |
| 5-Metilbenzotiofeno | ppm | 0,00 | 0,00 |
| 2-Metilbenzotiofeno | ppm | 0,00 | 0,00 |

5.3.3 Composición de la corriente de alimentación de acuerdo al PIANO

La composición de la corriente de alimentación es la base para obtener un alquilato liviano de buena calidad con potencial para convertirse en Avgas. De acuerdo a la figura 13 el alquilato total es rico en isoparafinas y la nafta craqueada en olefinas, lo que conlleva a que a medida que aumente la relación de mezclado aumente la presencia de olefinas en la corriente de alquilato liviano, ocasionando la formación de gomas en los motores de las avionetas. Se realizó la relación de mezclas utilizando como herramienta la simulación con base al piano de las dos

corrientes, analizando la composición de acuerdo a los grupos de compuestos; parafinas, isoparafinas, aromáticos, naftenos, olefinas y los compuestos azufrados. El resumen de la composición para cada una de las mezclas se presenta en la figura 19. De acuerdo a la figura, a medida que la cantidad de nafta craqueada aumenta en la relación de mezclado, aumenta la cantidad de naftenos, olefinas y azufre, siendo las olefinas las que presentan un crecimiento más significativo y las isoparafinas disminuyen gradualmente a razón de un 5.95% aproximadamente.

Figura 19 PIANO en la corriente de alimentación de acuerdo a la relación de mezclas





Teniendo en cuenta los análisis PIANO del laboratorio para el Alquilato Total y la Nafta Craqueada, se obtuvieron cada uno de los gráficos anteriores, de los cuales se deduce que la presencia de olefinas establece un límite de mezclado con un contenido máximo de 10% de olefinas. Para determinar qué mezclas se ajustan a los parámetros establecidos, se realizaron las comparaciones de los PIANOS producto de las simulaciones en Aspen Hysys de la corriente de alquilato liviano las cuales se representan en la figura 20. Según los resultados obtenidos en las gráficas, las mezclas de 90%-10% y 80%-20% de alquilato total con nafta craqueada son las que permiten obtener una composición con potencial para la obtención de alquilato liviano.

Las mezclas con potencial para convertirse en alquilato liviano presentan un alto contenido de olefinas que pueden dar lugar a reacciones de oxidación y polimerización formando gomas que pueden obstruir el sistema de aspiración y filtros, motivo por el cual es necesario adicionar inhibidores u antioxidantes para brindar un combustible que asegure calidad, seguridad y rendimiento para los motores de las avionetas y las personas que utilizan estos vehículos.

5.3.4 Adición de tetraetilo de plomo (TEL)

El octanaje del alquilato liviano es lo que lo distingue de otros combustibles, por lo que debe mantener esta propiedad con pequeñas desviaciones aún después de llevarse a cabo el proceso de mezclado. De esta manera se calculó el octanaje utilizando el método de Albahri para calcular el RON, el MON y determinar así el

índice de octano tanto de la corriente de alimentación como de la corriente de alquilato liviano para cada una de las mezclas realizadas (Albahri, 2002). Los resultados se presentan en la tabla 14.

Figura 20 PIANO simulado de la corriente de Alquilato Liviano de acuerdo a la relación de mezclas

**a) Relación de mezcla de 90% Alquilato Total
10% Nafta craqueada**



**b) Relación de mezcla de 80% Alquilato Total
20% Nafta craqueada**



**c) Relación de mezcla de 70% Alquilato Total
30% Nafta craqueada**



**d) Relación de mezcla de 60% Alquilato Total
40% Nafta craqueada**



**e) Relación de mezcla de 50% Alquilato Total
50% Nafta craqueada**



Tabla 14 Índice de octano para la regla de mezclas de las corrientes de alimentación y alquilato liviano de acuerdo al método de Albahri

| Relación de mezclas | Unidades | Alimentación | Alquilato Liviano |
|---------------------|----------|--------------|-------------------|
| 90%-10% | Octanos | 92,92 | 92,71 |
| 80%-20% | Octanos | 92,36 | 92,35 |
| 70%-30% | Octanos | 91,87 | 92,07 |
| 60%-40% | Octanos | 91,37 | 91,72 |
| 50%-50% | Octanos | 90,88 | 91,26 |

En el área de preparación de gasolinas (Materias Primas y Productos terminados) se le adiciona el tetraetilo de plomo al alquilato liviano con el fin de obtener un número de octano supercarga de 130. Para determinar la cantidad de tetraetilo de plomo a agregar, primero es necesario determinar el número de unidades que le hacen falta a la corriente para alcanzar los 130 puntos en la escala de octanaje teniendo en cuenta que la presencia de azufre aumenta el número de unidades, y que la predicción del octano tiene un error del 2%, para de esta manera tener el puntaje total y así conocer cuánto tetraetilo de plomo se debe agregar para alcanzar el valor final. Los resultados de la cantidad de tetraetilo de plomo que se debe adicionar a cada mezcla, teniendo en cuenta la presencia de azufre y el error de predicción del índice de octano se presentan en la tabla 15. Los cálculos realizados se presentan en el Anexo F.

Tabla 15 Adición de tetraetilo de plomo a la corriente de alquilato liviano de acuerdo a la relación de mezclas

| Alquilato liviano | Valor del octanaje | Unidades para alcanzar 130 | Corrección por azufre | Corrección de predicción | Total unidades para alcanzar 130 | TEL a adicionar (ml TEL/l) |
|-------------------|--------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Caso base | 92,96 | 37,04 | 0,00 | 0,74 | 37,78 | 0,56 |
| Mezcla 90%-10% | 92,71 | 37,29 | 1,00 | 0,75 | 39,04 | 0,58 |
| Mezcla 80%-20% | 92,35 | 37,65 | 1,00 | 0,75 | 39,41 | 0,59 |
| Mezcla 70%-30% | 92,07 | 37,93 | 1,00 | 0,76 | 39,69 | 0,59 |
| Mezcla 60%-40% | 91,72 | 38,28 | 1,00 | 0,77 | 40,04 | 0,60 |
| Mezcla 50%-50% | 91,26 | 38,74 | 1,00 | 0,77 | 40,52 | 0,61 |

El valor máximo permitido de tetraetilo de plomo que permite la norma es de 1.06 mL/L y de acuerdo a la tabla anterior los valores de tetraetilo de plomo que se

deben agregar a las mezclas en estudio oscilan en un rango que va desde 0.56 hasta 0.61 mL TEL/L, cumpliendo así con las especificaciones legales.

5.3.5 Índice de bloqueo de vapor (IBV)

De acuerdo a la ecuación 2, se calculó el índice de bloqueo de vapor (IBV) como parámetro para controlar el bloqueo de vapor y otros problemas de los combustibles calientes. Los resultados se presentan a continuación:

Tabla 16 Índice de bloqueo de vapor (IBV) para las corrientes de alimentación y alquilato liviano

| Corriente | Unidad | Relación de mezclas Alquilato Vs Nafta craqueada | | | | |
|-------------------|--------|--|---------|---------|---------|---------|
| | | 90%-10% | 80%-20% | 70%-30% | 60%-40% | 50%-50% |
| Alimentación | kPa | 517,55 | 545,68 | 573,79 | 599,54 | 636,83 |
| Alquilato liviano | kPa | 571,74 | 631,62 | 652,83 | 679,33 | 724,89 |

Los parámetros obtenidos se encuentran por debajo de 800 kPa, lo que de acuerdo a Chevron asegura una buena protección contra los problemas que acarrearán los combustibles calientes, es decir que existe una probabilidad muy baja de que se presenten bloqueos de vapor en las corrientes de alimentación y alquilato liviano en cualquiera de las relaciones de mezclado.

5.3.6 Producto pesado de la destilación de la mezcla de alquilato total con nafta craqueada

Para establecer el destino de la corriente de fondo, es necesario conocer las propiedades de dicha corriente. Por tal motivo se calcularon las mismas propiedades que para el alquilato liviano (curvas de destilación ASTM D-86, presión de vapor reid, RON, MON índice de octano, índice de bloqueo de vapor y composición de acuerdo al PIANO). Los valores de cada propiedad calculada se resumen en la tabla 17.

De acuerdo a la tabla 17 a medida que aumenta la presencia de nafta craqueada en la corriente de alimentación, la corriente de fondo se torna más liviana, es decir que los cortes necesitan menos temperatura para evaporarse. El mismo panorama

se presenta con los indicadores de octanaje, como lo son el RON, el MON y en consecuencia el índice de Octano, disminuyendo ligeramente su valor a medida que aumenta la relación de mezclas. Un panorama inverso se presenta en la presión de vapor Reid (RVP) y en el índice de bloqueo de vapor (IBV) los cuales son inversamente proporcionales a los cortes de destilación ASTM D-86.

Tabla 17 Propiedades del producto de fondo de la destilación de acuerdo a la relación de mezclas utilizada

| Componente | Unidad | Relación de mezclas Alquilate Vs Nafta craqueada | | | | |
|-----------------------------|---------|--|---------|---------|---------|---------|
| | | 90%-10% | 80%-20% | 70%-30% | 60%-40% | 50%-50% |
| Punto inicial de ebullición | °F | 370,4 | 360,8 | 354,7 | 351,8 | 349,6 |
| 10% vol evaporado | °F | 383,0 | 373,1 | 368,1 | 364,5 | 362,0 |
| 40% vol evaporado | °F | 421,2 | 399,5 | 388,8 | 386,0 | 381,7 |
| 50% vol evaporado | °F | 467,4 | 410,4 | 397,8 | 392 | 385,2 |
| 90% vol evaporado | °F | 470,6 | 459,5 | 459,3 | 453,8 | 455,7 |
| Punto final de ebullición | °F | 470,7 | 459,6 | 459,4 | 454 | 456,1 |
| 50% + 10% | °F | 850,4 | 783,5 | 765,8 | 756,7 | 747,1 |
| Presión de vapor Reid (RVP) | psi | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,05 |
| RON | - | 95,1 | 93,5 | 93,1 | 92,7 | 91,9 |
| MON | - | 88,3 | 86,6 | 86,1 | 85,8 | 85,1 |
| Índice de Octano | Octanos | 91,7 | 90,1 | 89,6 | 89,3 | 88,5 |
| Índice de bloqueo de vapor | kPa | 2,1 | 2,6 | 2,9 | 3,2 | 3,4 |

Otro parámetro a tener en cuenta es el contenido de azufre. En la tabla 18 se presenta el contenido de azufre simulado de la corriente de fondo de acuerdo a la relación de mezclas alquilato total – nafta craqueada.

Tabla 18 Contenido de azufre simulado en la corriente de fondo de acuerdo a la regla de mezclas alquilato total-nafta craqueada

| Relación de mezclas Alquilato - Nafta Craqueada | Unidad | Contenido de azufre |
|---|--------|---------------------|
| 90%-10% | ppm | 456,93 |
| 80%-20% | ppm | 812,36 |
| 70%-30% | ppm | 1094,39 |
| 60%-40% | ppm | 1185,42 |
| 50%-50% | ppm | 1207,33 |

De acuerdo a las propiedades determinadas en las tablas 17 y 18, dicha corriente puede ser enviada al pool de gasolinas craqueadas en donde finalmente se mezcla con otras gasolinas para su adecuación química y posterior comercialización.

5.3.7 Viabilidad de las mezclas de alquilato total y nafta craqueada

Al mezclar el alquilato total con la nafta craqueada, las propiedades que se obtienen en la corriente de alquilato liviano deben mantenerse dentro de los parámetros establecidos. De esta manera se realizó un estudio de viabilidad teniendo en cuenta los parámetros de calidad establecidos por Ecopetrol S.A. como las curvas de destilación, presión de vapor reid, presencia de azufre, cantidad de isoparafinas presentes y por último la cantidad de tetraetilo de plomo a adicionar. En la tabla 19 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para determinar la viabilidad de las mezclas.

Tabla 19 Resumen de cálculo de la viabilidad de las mezclas de alquilato total-nafta craqueada

| Componente | Parámetro | Relación de mezclas Alquilato Vs Nafta craqueada | | | | |
|-----------------------------|--------------|--|---------------|------------------|------------------|------------------|
| | | 90%σ-10% | 80%σ-20% | 70%σ-30% | 60%σ-40% | 50%σ-50% |
| Punto inicial de ebullición | Reportar | 106,5 | 105,1 | 104,1 | 102,7 | 100,7 |
| 10% vol evaporado | <167°F | 140,7 | 139,7 | 138,6 | 136,9 | 133,1 |
| 40% vol evaporado | >167°F | 206,6 | 198,5 | 197,5 | 194,4 | 185,7 |
| 50% vol evaporado | <221°F | 217,4 | 217,3 | 217,3 | 212,9 | 204,8 |
| 90% vol evaporado | <275°F | 253,8 | 256,7 | 259,5 | 261,3 | 263,4 |
| Punto final de ebullición | <338°F | 295,4 | 300,6 | 304,3 | 304,6 | 306,1 |
| 50% + 10% | >275°F | 358,1 | 357,0 | 355,9 | 349,8 | 337,9 |
| Presión de vapor reid (RVP) | 5,5-7,1 psia | 6,81 | 7,10 | 7,39 | 7,70 | 7,99 |
| Azufre | 500ppm | 31,53 | 64,65 | 101,19 | 159,58 | 231,23 |
| Olefinas | <10% | 3,75% | 7,55% | 11,69% | 16,15% | 20,70% |
| Tetraetilo de plomo (TEL) | ml/l | 0,58 | 0,59 | 0,59 | 0,60 | 0,61 |
| Viabilidad | | Viable | Viable | No viable | No viable | No viable |

En la tabla 19 se destacan las relaciones de mezclas viables. El límite de mezclado se estableció en la mezcla de 80% de alquilato total y 20% de nafta craqueada, siendo limitado por el contenido de olefinas y por la presión de vapor reid. Cabe aclarar que estas mezclas se realizaron en panoramas pesimistas, usando corrientes de alquilato total y nafta craqueada con un RVP por encima del promedio, lo que podría dar lugar a un mayor porcentaje de mezcla en casos operacionales que mejoren las composiciones y condiciones de proceso.

5.4 INCORPORACIÓN DE LA CORRIENTE DE NAFTA CRAQUEADA (100%) EN EL CASO BASE Y VERIFICACIÓN DE LAS CORRIENTES DE SALIDA (ALTERNATIVA 2)

La Incorporación de la nafta craqueada como única corriente de alimentación a la torre T-4565 se realizó tomando como base el montaje PFD presentado en la figura 14, donde las únicas variaciones son las denominaciones de las corrientes involucradas en el esquema, donde ahora como corriente de entrada se incorpora la nafta craqueada y como corrientes de salida se obtienen la nafta craqueada liviana (cima) y nafta craqueada pesada (fondo).

Las variables fijas de operación utilizadas en el caso base se mantuvieron en este estudio, el cual se realizó ingresando componente por componente, reuniendo un total de 226 compuestos agrupados en; parafinas, isoparafinas, aromáticos, naftenos, olefinas y compuestos azufrados, seleccionando como ecuación de estado el paquete de fluidos de Peng Robinson.

5.4.1 Determinación del porcentaje de aprovechamiento de la nafta craqueada en función del contenido de azufre

Para determinar el porcentaje de aprovechamiento de la nafta craqueada que permite obtener una concentración aproximada a 300 ppm de azufre, se variaron

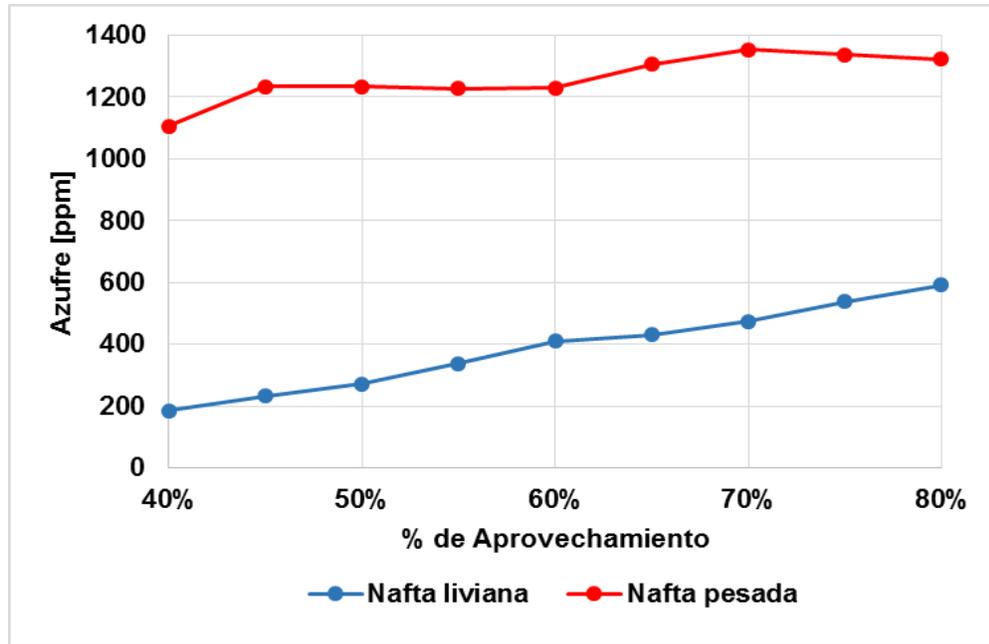
los porcentajes de aprovechamiento desde el 80% hasta el 40% en intervalos de 5%. Los flujos de alimentación, nafta craqueada liviana y el reflujo a la torre fueron determinados, los resultados se presentan a continuación:

Tabla 20 Variables a manipular para determinar el porcentaje de aprovechamiento

| Componente | Unidades | Porcentaje de aprovechamiento | | | | | | | | |
|---------------------|------------|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 80% | 75% | 70% | 65% | 60% | 55% | 50% | 45% | 40% |
| Alimentación | Barril/día | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 | 2000 |
| Aprovechamiento | Porcentaje | 80% | 75% | 70% | 65% | 60% | 55% | 50% | 45% | 40% |
| Flujo nafta liviana | Barril/día | 1600 | 1500 | 1400 | 1300 | 1200 | 1100 | 1000 | 900 | 800 |
| Reflujo | Barril/día | 385,5 | 361,4 | 337,3 | 313,3 | 289,2 | 265,1 | 241,0 | 216,9 | 192,8 |

Una vez determinadas las variables a manipular, se realizaron las simulaciones y se determinó el contenido de azufre tanto en la corriente de nafta craqueada liviana como en la corriente de nafta craqueada pesada. Los resultados se presentan en la figura 21.

Figura 21 Contenido de azufre de acuerdo a la simulación en función del porcentaje de aprovechamiento para la nafta craqueada liviana (producto de cima) y para la nafta craqueada pesada (producto de fondo)



En la figura 21 se grafican los valores arrojados por la simulación del contenido de azufre para la nafta craqueada liviana (cima) y para la nafta craqueada pesada (fondo), en la nafta craqueada liviana el contenido de azufre presenta un comportamiento lineal, mientras que el contenido de azufre en la nafta craqueada pesada a pesar que visualmente aparenta un comportamiento lineal, realmente presenta un comportamiento no lineal, debido a que fue necesario utilizar ecuaciones de segundo orden para predecir su comportamiento. Las ecuaciones que rigen estos comportamientos se presentan en la tabla 21 a continuación:

Tabla 21 Ecuaciones y coeficiente de determinación (R^2) para las corrientes de nafta craqueada liviana y nafta craqueada pesada

| Corriente | Ecuación | R^2 |
|-------------------------|---|-------|
| Nafta craqueada liviana | $z = 1013,5 * \%ap - 222,26$ | 0,99 |
| Nafta craqueada pesada | $z = -1036,5 * \%ap^2 + 1739,9 * \%ap + 607,11$ | 0,82 |

Donde:

z = contenido de azufre en partes por millón (ppm)

$\%ap$ = porcentaje de aprovechamiento

Para determinar el porcentaje de aprovechamiento que permite obtener alrededor de 300 ppm de azufre en la corriente de nafta craqueada liviana se utilizó la ecuación 1 de la tabla 21, donde se obtuvo un valor del 52% de aprovechamiento. Teniendo en cuenta que la corriente de alimentación presenta variaciones en el contenido de azufre, el porcentaje de aprovechamiento para mantener el contenido de azufre en el producto dentro de los niveles permitidos oscila entre 45% hasta 55%.

5.4.2 Propiedades de la corriente de nafta craqueada liviana de acuerdo a los porcentajes de aprovechamiento determinados como viables

El fraccionamiento de la nafta craqueada conlleva a que las corrientes resultantes tengan propiedades diferentes, como composición, porcentaje de destilación, RON, MON, índice de octano, presión de vapor reid (RVP) entre otras. Estas propiedades se resumen en la tabla 22.

La nafta craqueada es un combustible donde priman las olefinas y las isoparafinas, presentando un contenido promedio del 37% y 28% respectivamente, representando el 65% del total de compuestos presentes. Es así que se analizó el contenido de la corriente de nafta craqueada liviana partiendo de las simulaciones

hechas con el PIANO de la nafta craqueada para los porcentajes de aprovechamiento de 45%, 50% y 55%, los resultados se presentan en la figura 22. En este caso, la nafta craqueada liviana ha incrementado su contenido de olefinas hasta un promedio del 57% y a su vez las isoparafinas han disminuido su porcentaje de contenido hasta alcanzar en promedio el 21%:

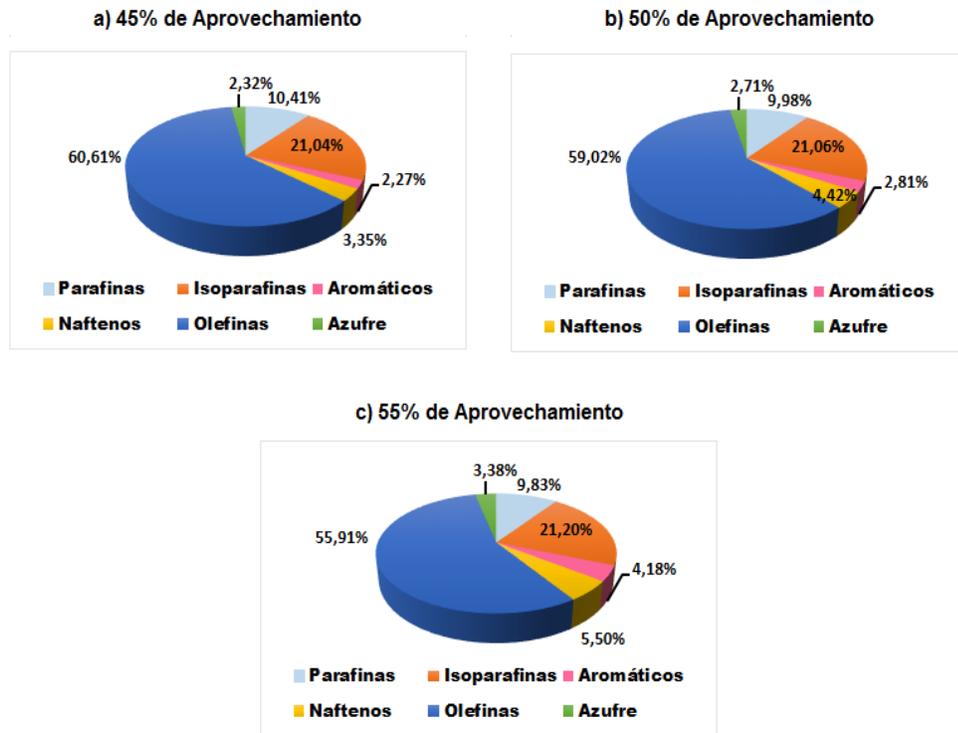
Tabla 22 Propiedades de la nafta craqueada liviana de acuerdo al porcentaje de aprovechamiento

| Componente | Unidad | Porcentaje de aprovechamiento | | |
|-----------------------------|--------|-------------------------------|---------|---------|
| | | 55% | 50% | 45% |
| Punto inicial de ebullición | °F | 73,56 | 69,70 | 58,17 |
| 10% vol evaporado | °F | 116,38 | 114,01 | 104,36 |
| 40% vol evaporado | °F | 127,42 | 123,48 | 113,08 |
| 50% vol evaporado | °F | 150,86 | 143,14 | 119,16 |
| 90% vol evaporado | °F | 219,19 | 187,93 | 171,13 |
| Punto final ebullición | °F | 255,56 | 241,11 | 228,46 |
| 50% + 10% | °F | 267,25 | 257,15 | 223,53 |
| Presión de vapor (RVP) | psi | 11,10 | 11,97 | 12,92 |
| RON | - | 89,87 | 91,14 | 92,22 |
| MON | - | 83,28 | 84,37 | 85,36 |
| IBV | - | 1228,29 | 1326,71 | 1487,66 |

El contenido de olefinas de la nafta craqueada liviana aumenta su presencia a medida que el porcentaje de aprovechamiento disminuye, es decir que su concentración ha aumentado, lo que conlleva a que el contenido de olefinas supere el 19% que se ha establecido a nivel experimental como parámetro para mantener la estabilidad a la oxidación.

Ninguno de los porcentajes de aprovechamiento cumple con la estabilidad a la oxidación una vez sale de la torre T-4565. Esta situación no afecta la implementación de esta alternativa, ya que Ecopetrol S.A cuenta con un dispositivo para inyección de antioxidante, es un agente químico para corregir el alto contenido de olefinas, por lo tanto esta alternativa (aún con esta limitante) se considera viable.

Figura 22 PIANO de la corriente nafta craqueada liviana de acuerdo al porcentaje de aprovechamiento



5.5 Evaluación económica

Para determinar el potencial económico de las alternativas, es necesario conocer los ingresos dejados de percibir, la proyección de la evaluación económica, la inversión necesaria para desarrollarlas y por último verificar su viabilidad.

5.5.1 Determinación de ingresos dejados de percibir en los últimos 4 años para la alternativa 1

La determinación de los ingresos dejados de percibir en los últimos 4 años se desarrolló en cuatro pasos. El primero de ellos se realizó determinando el flujo de caja de la operación actual de la torre (caso base). El segundo de ellos consiste en determinar los ingresos que se hubieran recibido si la torre operara tomando como alimentación una mezcla de alquilato total con nafta craqueada con una relación volumétrica de 80%-20% respectivamente. En tercer lugar se calculó la cantidad

de alquiler total que se dejó de consumir y el valor que representa. Por último se realizó el cálculo de los ingresos dejados de percibir a partir de la suma del flujo de caja de la mezcla con el flujo de caja producto de la venta de alquiler total no consumido y a este valor se le restó el flujo de caja de operación de la torre en operación actual.

Para determinar los ingresos dejados de percibir en los últimos 4 años fue necesario determinar las ventas históricas de alquiler liviano reportadas, junto con los precios históricos de las corrientes involucradas. Los valores se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 23 Ventas históricas de alquiler liviano, precio del alquiler liviano producto y de la nafta craqueada

| Año | Ventas Alquiler liviano (barriles /año) | Precio del Alquiler Total USD/barril | Precio de la Nafta craqueada USD/barril | Precio del Alquiler Liviano USD/barril |
|-----------------|---|--------------------------------------|---|--|
| 2012 | 120828 | 117,11 | 113,69 | 139,97 |
| 2013 | 164221 | 111,57 | 114,20 | 129,18 |
| 2014 | 142090 | 103,06 | 98,63 | 126,05 |
| 2015 | 90685 | 63,27 | 65,33 | 82,17 |
| Promedio | 129456,08 | 98,75 | 97,96 | 119,34 |

5.5.1.1 Flujo de caja del caso base

El flujo de caja del caso base se llevó a cabo partiendo de los flujos de las tres corrientes involucradas en el estado de operación actual; La corriente de alimentación (alquiler total) se determinó a partir del porcentaje de aprovechamiento que para el caso base es de 85%, la corriente de cima (alquiler liviano) se determinó a partir de las ventas históricas del alquiler liviano, para finalizar, el flujo de fondo (alquiler pesado) se calculó tomando el 15% del flujo de alimentación de la torre. El resumen de los flujos se presenta en la tabla 24.

Por las características del alquiler pesado, el Departamento de Cracking II, le asigna el mismo precio que el presentado por el alquiler total. Una vez

determinados los flujos y los precios asociados a cada corriente se calculó el flujo de caja de los ingresos recibidos por Ecopetrol S.A. desde el año 2012 hasta el año 2015. Los valores se resumen en la tabla 25.

Tabla 24 Flujos volumétricos anuales de la torre T-4565 para el caso base

| Año | Flujo Alquilero Total (barriles /año) | Flujo Alquilero Liviano (barriles /año) | Flujo Alquilero Pesado (barriles /año) |
|-----------------|---------------------------------------|---|--|
| 2012 | 142151 | 120828 | 21323 |
| 2013 | 193202 | 164221 | 28980 |
| 2014 | 167165 | 142090 | 25075 |
| 2015 | 106688 | 90685 | 16003 |
| Promedio | 152301,27 | 129456,08 | 22845,19 |

Tabla 25 Flujo de caja para el estado de operación actual de la torre T-4565

| Año | Ingresos Alquilero Liviano (USD) | Ingresos Alquilero Pesado (USD) | Gastos Alquilero Total (USD) | Flujo de caja (USD) |
|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------|
| 2012 | \$ 16.912.803 | \$ 2.497.096 | \$ 16.647.307 | \$ 2.762.592 |
| 2013 | \$ 21.214.567 | \$ 3.233.324 | \$ 21.555.494 | \$ 2.892.397 |
| 2014 | \$ 17.910.807 | \$ 2.584.202 | \$ 17.228.011 | \$ 3.266.999 |
| 2015 | \$ 7.451.398 | \$ 1.012.519 | \$ 6.750.130 | \$ 1.713.788 |
| Promedio | \$15.872.393,63 | \$2.331.785,30 | \$15.545.235,34 | \$ 2.658.943,59 |

5.5.1.2 Flujo de caja de la alternativa 1

La alternativa 1 tiene involucradas dos corrientes de entrada y dos de salida. El flujo de ventas de alquilero liviano permanece constante, y a partir de él se determinaron los demás flujos. De acuerdo a la regla de mezclas se obtuvo que la mezcla de 80% de alquilero total y 20% de nafta craqueada, operando con 89% de recuperación en volumen del fraccionamiento, es la mezcla con mayor potencial económico que cumple con los parámetros requeridos para la producción de alquilero liviano dentro de especificaciones. Partiendo de esta información se determinó el flujo de alimentación y de acuerdo a la regla de mezclas se estableció

el flujo de alimentación de alquilato total y nafta craqueada necesarios para mantener el volumen de producción de alquilato liviano. El valor de los flujos de entrada y salida involucrados se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 26 Flujos volumétricos anuales de la torre T-4565 para la alternativa 1

| Año | Flujo Alquilato Total (barriles /año) | Flujo Nafta craqueada (barriles /año) | Flujo Alquilato Liviano (barriles /año) | Flujo fondo de mezcla (barriles /año) |
|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---|---------------------------------------|
| 2012 | 108610 | 27152 | 120828 | 14934 |
| 2013 | 147615 | 36904 | 164221 | 20297 |
| 2014 | 127721 | 31930 | 142090 | 17562 |
| 2015 | 81514 | 20379 | 90685 | 11208 |
| Promedio | 116365,02 | 29091,25 | 129456,08 | 16000,19 |

Por las características del flujo de fondo, el Departamento de Cracking II, le asigna el mismo precio que el de la nafta craqueada. Una vez determinados los flujos y los precios asociados a cada corriente se calculó el flujo de caja de los ingresos recibidos por Ecopetrol S.A. desde el año 2012 hasta el año 2015. Los valores se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 27 Flujo de caja para la alternativa 1 de la torre T-4565

| Año | Ingresos Alquilato Liviano (USD) | Ingresos Fondo (USD) | Gastos Alquilato Total (USD) | Gastos Nafta Craqueada (USD) | Flujo de caja (USD) |
|-----------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 2012 | \$ 16.912.803 | \$ 1.697.901 | \$ 12.719.291 | \$ 3.087.092 | \$ 2.804.320 |
| 2013 | \$ 21.214.567 | \$ 2.318.014 | \$ 16.469.366 | \$ 4.214.572 | \$ 2.848.643 |
| 2014 | \$ 17.910.807 | \$ 1.732.164 | \$ 13.162.974 | \$ 3.149.388 | \$ 3.330.608 |
| 2015 | \$ 7.451.398 | \$ 732.195 | \$ 5.157.402 | \$ 1.331.263 | \$ 1.694.927 |
| Promedio | \$15.872.393,63 | \$1.620.068,34 | \$11.877.258,46 | \$ 2.945.578,80 | \$2.669.624,71 |

5.5.1.3 Ingresos por concepto de ahorro de Alquilato Total

Para determinar el ahorro de Alquilato Total se calculó la diferencia existente en los flujos calculados en las tablas 24 y 26. Este flujo se multiplicó por el precio histórico del alquilato total. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 28 Ingresos por concepto de ahorro de Alquilero Total

| Año | Ingresos Alquilero Total (USD) |
|-----------------|--------------------------------|
| 2012 | \$ 3.928.016,27 |
| 2013 | \$ 5.086.127,83 |
| 2014 | \$ 4.065.036,19 |
| 2015 | \$ 1.592.727,22 |
| Promedio | \$ 3.667.976,88 |

5.5.1.4 Total ingresos dejados de percibir en la alternativa 1

Una vez se han desarrollado los cálculos de todos los flujos de efectivo involucrados se procede a sumar los ingresos que habría generado Ecopetrol S.A implementando la alternativa 1 y se restan los ingresos que está recibiendo actualmente. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 29 Ingresos dejados de percibir en los últimos 4 años para la alternativa 1

| Año | Ingresos dejados de percibir (USD) | TRM (COP/USD) | Ingresos dejados de percibir (COP) |
|-----------------|------------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| 2012 | \$ 3.969.745 | \$ 1.798 | \$ 7.136.285.712 |
| 2013 | \$ 5.042.374 | \$ 1.869 | \$ 9.422.924.701 |
| 2014 | \$ 4.128.646 | \$ 2.000 | \$ 8.258.907.376 |
| 2015 | \$ 1.573.867 | \$ 2.741 | \$ 4.314.108.276 |
| Promedio | \$ 3.678.658 | \$ 2.102 | \$ 7.283.056.516 |

De acuerdo a la tabla anterior, se han dejado de percibir anualmente alrededor de \$7.283'056.516, lo que brinda una idea de la viabilidad para implementar dicha alternativa.

5.5.2 Determinación de ingresos dejados de percibir en los últimos 4 años para la alternativa 2

Para determinar los ingresos dejados de percibir en los últimos 4 años, primero es necesario determinar los flujos anuales de las corrientes implicadas. Para determinar el flujo de entrada es necesario determinar los días que no operó la torre y multiplicar por la carga de diseño (2000 barriles/día). El porcentaje de

aprovechamiento promedio establecido como viable es del 50%, lo que permitió calcular los flujos de nafta craqueada liviana y nafta craqueada pesada. Los valores se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 30 Flujos de la torre T-4565 cargada con nafta craqueada

| Año | DÍAS DE OPERACIÓN | NAFTA CRAQUEADA CARGADA A LA TORRE (BARRILES/AÑO) | NAFTA LIVIANA (BARRILES/AÑO) | NAFTA PESADA (BARRILES/AÑO) |
|------|-------------------|---|------------------------------|-----------------------------|
| 2012 | 256 | 511000 | 255500 | 255500 |
| 2013 | 201 | 401500 | 200750 | 200750 |
| 2014 | 219 | 438000 | 219000 | 219000 |
| 2015 | 274 | 547500 | 273750 | 273750 |

Para determinar el potencial de ingresos primero se deben determinar los precios históricos de la corriente de nafta craqueada, nafta craqueada liviana (gasolina extra) y nafta pesada (diluyente del combustóleo) los cuales se presentan en la tabla 31.

Tabla 31 Precios de las corrientes de nafta craqueada, nafta liviana y nafta pesada como diluyente

| Año | PRECIO DE NAFTA CRAQUEADA USD/Barril | PRECIO DE NAFTA LIVIANA USD/Barril | PRECIO NAFTA PESADA (DILUYENTE) USD/Barril |
|------|--------------------------------------|------------------------------------|--|
| 2012 | 113,69 | 132,36 | 113,69 |
| 2013 | 114,20 | 130,81 | 114,20 |
| 2014 | 98,63 | 121,83 | 98,63 |
| 2015 | 65,33 | 94,34 | 65,33 |

A partir de los flujos que se calcularon en la tabla 30 y los precios de la tabla 31 se determinó el potencial de ingresos antes de costos, el cual se presenta en la tabla

32. Los resultados obtenidos muestran en primer plano que esta alternativa es viable mostrando ingresos prometedores.

Tabla 32 Ingresos antes de costos de la alternativa 2

| Año | COSTO ANUAL NAFTA CRAQUEADA (USD) | INGRESOS ANUALES NAFTA LIVIANA (USD) | INGRESOS ANUALES NAFTA PESADA (USD) | INGRESOS ANUALES TOTALES (USD) | INGRESOS ANUALES ANTES DE COSTOS (USD) |
|------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--|
| 2012 | \$ 58.098.056 | \$ 33.817.980 | \$ 29.049.028 | \$ 62.867.008 | \$ 4.768.952 |
| 2013 | \$ 45.853.186 | \$ 26.260.108 | \$ 22.926.593 | \$ 49.186.700 | \$ 3.333.515 |
| 2014 | \$ 43.201.259 | \$ 26.680.770 | \$ 21.600.630 | \$ 48.281.400 | \$ 5.080.140 |
| 2015 | \$ 35.766.364 | \$ 25.825.911 | \$ 17.883.182 | \$ 43.709.093 | \$ 7.942.729 |

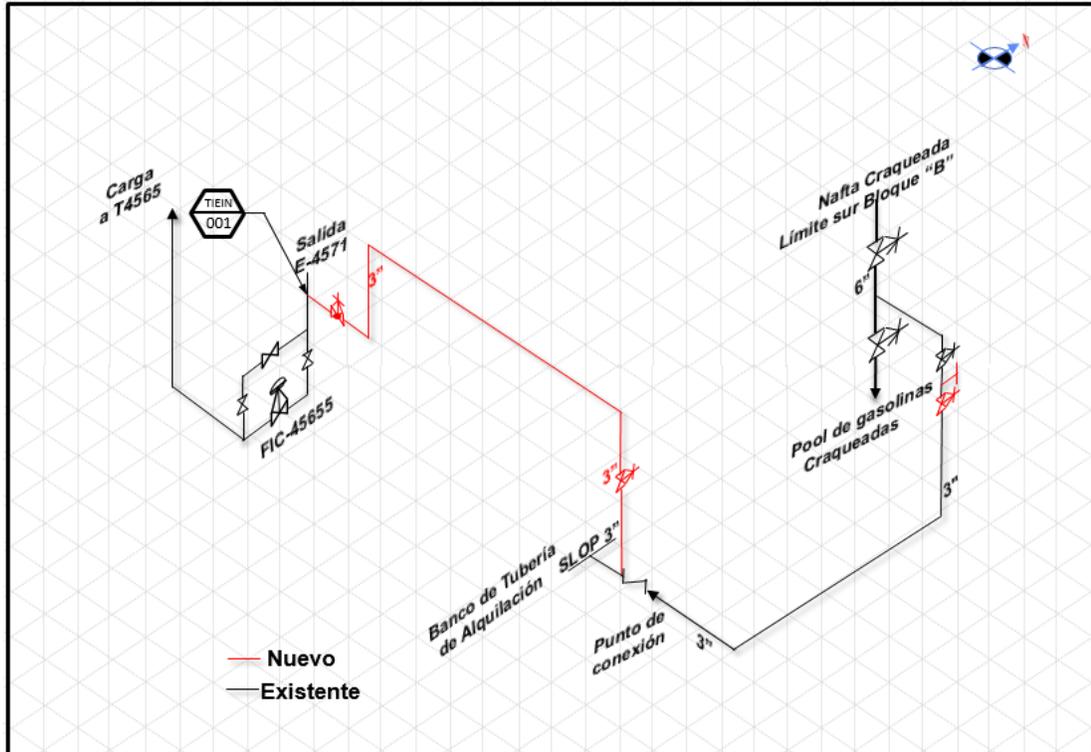
5.5.3 Inversión necesaria para construir la línea de nafta craqueada hacia la torre T-4565

La inversión total del proyecto se enfocó en el trazado que une la línea de nafta craqueada con la línea de alquiler total que actualmente alimenta a la torre T-4565. Esta línea consta de 2 partes, una primera línea ya existente que parte de la corriente de nafta craqueada que se dirige hacia el pool de gasolinas y llega hasta un punto de conexión ubicado en el banco de tuberías de alquiler, donde será necesario construir una nueva línea que irá desde este punto hasta la tubería de alquiler total que alimenta a la torre. El trazado total involucrado se resume en la figura 23.

Una vez diseñado el trazado se determinaron los accesorios necesarios para construir la nueva línea y nuevos accesorios para la línea ya existente. En segunda instancia se cotizaron los precios para determinar la inversión total necesaria, los cuales se resumen en la tabla 33.

Además de la inversión determinada, durante la instalación surgen una serie de costos adicionales como la soldadura, radiografías a la soldadura y pintura. La cantidad de material utilizado junto con el precio respectivo fue brindado por el líder de costos del departamento de cracking II en base a otros proyectos realizados recientemente. Estos resultados se resumen en la tabla 34.

Figura 23 Trazado de la línea de nafta craqueada hacia la torre T-4565



Debido a que la línea existente lleva varios años fuera de servicio es necesario realizar un mantenimiento a toda la línea, motivo por el cual se asignan \$10'000.000 COP para materiales y ensayos (Líder de costos del departamento de cracking II, 2016).

Se determinaron los costos de mano de obra necesarios para construir el nuevo tramo de tubería y realizar el mantenimiento de la línea ya existente en un periodo de construcción total de 2 semanas. El tipo de contratación empleado será prestación de servicios y las prestaciones sociales de ley serán asumidas por los empleados. La cantidad de horas utilizadas y el valor que cobra cada empleado por hora fueron suministrados por el líder de costos de cracking II. La inversión total necesaria en mano de obra se presenta en la tabla 35.

Tabla 33 Costos trazado de la construcción de la línea de nafta craqueada hacia la torre T-4565

| CANTIDAD | DESCRIPCIÓN | UNIDAD | VALOR UNITARIO (COP) | VALOR TOTAL (COP) |
|--------------|---|----------|----------------------|-----------------------|
| 72 | Tubería en acero al carbono de 3"X6m, de acuerdo a la norma ASTM A-53 grado A, sin costura calibre 40. | METROS | \$ 43.152,00 | \$ 3.106.944,00 |
| 3 | T en acero al carbono de 3" de acuerdo a la norma ASTM A-53 grado A, sin costura calibre 40. | UNIDADES | \$ 16.124,00 | \$ 48.372,00 |
| 4 | Codos de 90° en acero al carbono de 3" de acuerdo a la norma ASTM A-53 grado A, sin costura calibre 40. | UNIDADES | \$ 11.890,00 | \$ 47.560,00 |
| 14 | Bridas en acero al carbono de 3" de acuerdo a la norma ASTM A-53 grado A, sin costura calibre 40. | UNIDADES | \$ 41.452,60 | \$ 580.336,40 |
| 14 | Empaques espirometálicos de 3 x 150 | UNIDADES | \$ 6.869,52 | \$ 96.173,28 |
| 1 | Manómetro de 0-200psig. Diametro de caja 63mm. Vertical | UNIDADES | \$ 127.989,00 | \$ 127.989,00 |
| 2 | Válvulas de venteo de 3/4". | UNIDADES | \$ 5.669,00 | \$ 11.338,00 |
| 2 | Válvulas de drenaje de 3/4". Tipo bola acero carbon de 800 | UNIDADES | \$ 91.387,12 | \$ 182.774,24 |
| 1 | Indicador de temperatura. De 0-300°F. Diametro de caja 63mm. Vertical. | UNIDADES | \$ 22.875,00 | \$ 22.875,00 |
| 1 | Indicar de presión. Diametro 63mm. Vertical | UNIDADES | \$ 30.500,00 | \$ 30.500,00 |
| 2 | Válvula bloqueo de 3". | UNIDADES | \$ 205.875,00 | \$ 411.750,00 |
| 2 | Válvulas globo de 3" limite, by-pass FIC | UNIDADES | \$ 154.050,00 | \$ 308.100,00 |
| TOTAL | | | | \$4.974.711,92 |

Fuente: Cotización Ferretería Reina S.A, 2016

Tabla 34 Costos de materiales para la construcción de la línea de nafta craqueada hacia la torre T-4565

| Material/Equipo | Precio unitario (COP) | Cantidad | Total (COP) |
|-------------------|-----------------------|-------------|-------------------------|
| Maquina soldadora | \$30.0000/hora | 32 horas | \$ 9.600.000,00 |
| Varilla soldadura | \$20.000/unidad | 35 unidades | \$ 700.000,00 |
| Radiografia | \$22.0000/unidad | 12 unidades | \$ 2.640.000,00 |
| Pintura | \$80.000/galón | 8 galones | \$ 640.000,00 |
| Anticorrosivo | \$80.000/galón | 4 galones | \$ 320.000,00 |
| Pintura epóxica | \$100.000/galón | 4 galones | \$ 400.000,00 |
| Total | | | \$ 14.300.000,00 |

Fuente: Líder de costos del departamento de cracking II, Ecopetrol S.A, 2016

Tabla 35 Inversión total mano de obra

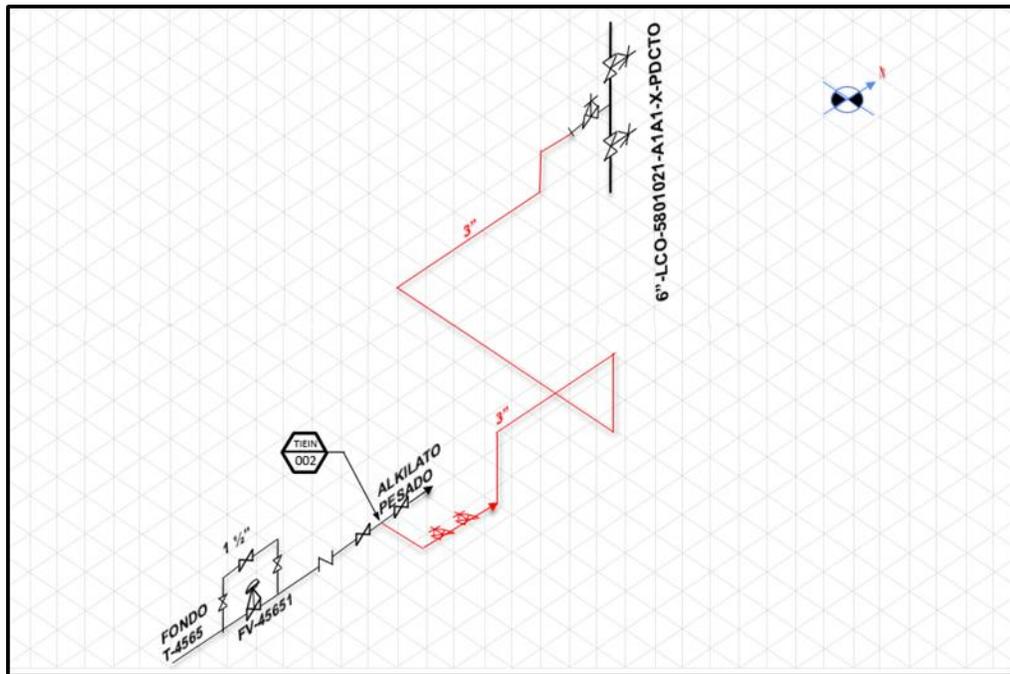
| Cargo | Horas hombre | Salario/hora (COP) | Salario total (COP) |
|-------------------------|--------------|--------------------|-------------------------|
| Planeador | 48 | \$ 220.000,00 | \$ 10.560.000,00 |
| Coordinador | 48 | \$ 220.000,00 | \$ 10.560.000,00 |
| Soldador oficial | 32 | \$ 160.000,00 | \$ 5.120.000,00 |
| Soldador auxiliar | 32 | \$ 80.000,00 | \$ 2.560.000,00 |
| Metalista oficial | 24 | \$ 100.000,00 | \$ 2.400.000,00 |
| Metalista auxiliar | 24 | \$ 80.000,00 | \$ 1.920.000,00 |
| Pintor | 128 | \$ 80.000,00 | \$ 10.240.000,00 |
| Instrumentista oficial | 24 | \$ 120.000,00 | \$ 2.880.000,00 |
| Instrumentista auxiliar | 24 | \$ 80.000,00 | \$ 1.920.000,00 |
| Electricista | 16 | \$ 80.000,00 | \$ 1.280.000,00 |
| Total | | | \$ 49.440.000,00 |

Teniendo en cuenta los costos de trazado de la línea, los costos de mano de obra, los costos de mantenimiento y los costos de materiales se obtuvo una inversión total de \$78'714.712 COP lo que se traduce en \$25.808USD a la fecha de hoy con una tasa de cambio de \$3.050 COP/USD.

5.6.4 Inversión necesaria para construir la línea de la salida de fondo de la torre T-4565 hasta la línea de nafta como diluyente

La inversión total de la alternativa 2 se enfocó en el trazado de dos líneas: la primera es la línea que une la nafta craqueada con la línea de alquilerato total que actualmente alimenta a la torre T-4565 (la cual se determinó en la alternativa 1); la segunda consta del trazado de la línea que une el fondo de la torre T-4565 con la línea de nafta que se usa como diluyente. El trazado involucrado se presenta en la figura 24.

Figura 24 Trazado de la línea del fondo de la torre T-4565 hacia la línea de nafta como diluyente



La línea presenta un trazado de 200 m, lo que quiere decir que es 2.86 veces más larga que el trazado de la alternativa 1. Por lo tanto la inversión necesaria para construir este nuevo trazado es de \$220'283.165 COP, lo que representa \$72.224 USD a una TRM de \$3050COP/USD.

5.6.5 Proyección de la evaluación económica para la alternativa 1

Para realizar la evaluación económica de la alternativa 1 es necesario en primera instancia determinar la cantidad de barriles de Avgas que se producirán en los próximos años. Teniendo en cuenta las ventas históricas de los últimos 4 años se proyectó mantener el promedio de ventas, es decir, 129.457 barriles por año.

Los precios de las corrientes incrementarán su valor con base en la inflación. Para proyectar la inflación hasta el año 2021 se creó una ecuación realizando una regresión no lineal para una ecuación de cuarto orden partiendo de los datos históricos de la inflación desde el año 2102 hasta el año 2015 tomados del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). El coeficiente de determinación (R^2) para esta ecuación es de 0,96.

$$\text{Inflación} = (8,52E - 14 * X^4 + 1,11E - 10 * X^3 + 4,64E - 07 * X^2 + 4,95E - 04 * X - 5,15) * 100\% \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

X= año donde se quiere calcular la inflación

Partiendo de la ecuación 10, se calculó la inflación de los próximos 5 años, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 36 Predicción de la inflación para los próximos 5 años

| Año | Inflación |
|------|-----------|
| 2017 | 3,82% |
| 2018 | 6,37% |
| 2019 | 7,02% |
| 2020 | 7,67% |
| 2021 | 8,33% |

Con base en los resultados de la inflación y partiendo de los precios presentados por las corrientes involucradas en 2015, se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 37 Precios de las corrientes involucradas para la alternativa 1

| Año | Ventas Alquilero liviano (barriles /año) | Precio del Alquilero Total USD/barril | Precio de la Nafta craqueada USD/barril | Precio del Alquilero Liviano USD/barril |
|------|--|---------------------------------------|---|---|
| 2017 | 129456 | 65,69 | 67,83 | 85,31 |
| 2018 | 129456 | 69,87 | 72,14 | 90,74 |
| 2019 | 129456 | 74,77 | 77,21 | 97,11 |
| 2020 | 129456 | 80,51 | 83,13 | 104,56 |
| 2021 | 129456 | 87,21 | 90,05 | 113,26 |

Partiendo de las ventas especificadas y realizando un balance similar al realizado para calcular los ingresos dejados de percibir, se determinó el flujo de ingresos para esta alternativa. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 38 Ingresos totales alternativa 1

| Año | Ingresos Totales (USD) |
|------|------------------------|
| 2017 | \$ 2.332.543,98 |
| 2018 | \$ 2.481.031,30 |
| 2019 | \$ 2.655.158,06 |
| 2020 | \$ 2.858.845,65 |
| 2021 | \$ 2.581.894,75 |

Por otro lado fue necesario determinar los costos adicionales del proceso, los cuales están representados en el Tetraetilo de plomo (TEL) necesario para convertir el alquilero liviano en Avgas. Para esto fue necesario intentar predecir el precio del TEL partiendo de una proyección de la inflación en Colombia tomando como base años anteriores. El precio del TEL para este año ha oscilado alrededor de los cuatro mil trescientos noventa pesos (\$4.390) COP/Litro. Partiendo de este valor se calculó el precio del TEL en los próximos 5 años.

Teniendo en cuenta la cantidad de TEL a adicionar de acuerdo a la tabla 15 para la mezcla de 80% alquilero total y 20% de nafta craqueada, se determinó la cantidad de TEL que se consumirá y su posible costo para los próximos 5 años. Los cálculos realizados se resumen en la tabla 39.

Para poder realizar el cálculo de los indicadores de rentabilidad es necesario que los ingresos y los costos estén en las mismas unidades, por lo que se realizó la conversión de los costos a dólares. Para esto se implementó un modelo de predicción de la TRM del dólar partiendo de los precios históricos desde el año 2012 hasta el año 2015 tomados del estado de pérdidas y ganancias del Departamento de Cracking II. De esta manera se desarrolló una regresión no lineal con coeficiente de determinación (R^2) de 0,97 para una ecuación polinomial de segundo orden la cual se presenta a continuación:

$$TRM = 0,00019 * X^2 + 295,41 * X - 593489,25 \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde **X** es el año donde se requiere calcular la TRM

Tabla 39 Costo tetraetilo de plomo para la mezcla de 80% de alquilato total y 20% de nafta craqueada

| Año | Ventas Alquilato liviano (barriles /año) | Ventas Alquilato liviano (litros /año) | TEL a adicionar (litros) | Precio TEL (COP/litro) | Costo anual de TEL (COP) |
|------|--|--|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| 2017 | 129456 | 20583517 | 11938 | \$ 4.557,07 | \$54.404.319,63 |
| 2018 | 129456 | 20583517 | 11938 | \$ 4.847,17 | \$57.867.641,88 |
| 2019 | 129456 | 20583517 | 11938 | \$ 5.187,36 | \$61.928.979,27 |
| 2020 | 129456 | 20583517 | 11938 | \$ 5.585,30 | \$66.679.793,96 |
| 2021 | 129456 | 20583517 | 11938 | \$ 6.050,28 | \$72.230.957,57 |

Una vez se determinó la ecuación de la TRM para los próximos 5 años, se procedió a realizar los respectivos cálculos y se resumieron los resultados en la siguiente tabla:

Tabla 40 TRM para los próximos 5 años

| Año | TRM (COP/USD) |
|------|------------------|
| 2017 | \$ 3.139 |
| 2018 | \$ 3.435 |
| 2019 | \$ 3.731 |
| 2020 | \$ 4.027 |
| 2021 | \$ 4.323 |

Partiendo de los datos obtenidos de las tablas 37 y 38 se calcularon los costos en dólares, los cuales se presentan a continuación:

Tabla 41 Costo tetraetilo de plomo para la mezcla de 80% de alquilato total y 20% de nafta craqueada en dólares

| Año | Costo anual de TEL (COP) | TRM (COP/USD) | Costo anual de TEL (USD) |
|------|--------------------------|---------------|--------------------------|
| 2017 | \$54.404.319,63 | \$ 3.138,64 | \$ 17.334 |
| 2018 | \$57.867.641,88 | \$ 3.434,83 | \$ 16.847 |
| 2019 | \$61.928.979,27 | \$ 3.731,02 | \$ 16.598 |
| 2020 | \$66.679.793,96 | \$ 4.027,22 | \$ 16.557 |
| 2021 | \$72.230.957,57 | \$ 4.323,41 | \$ 16.707 |

Una vez obtenidos los ingresos y los costos, se procedió a determinar el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y la relación beneficio costo (B/C) generado por la implementación de la presente alternativa.

Para determinar el VPN se realizó el flujo de caja y se estableció la tasa de interés en 20% debido a que es una inversión de alto riesgo. Por último se determinó el valor presente de cada uno de los años y se determinó que a la fecha de hoy el VPN para la alternativa 1 es de \$6'200.441 USD, lo que representa en pesos colombianos \$18.911'343.703 COP a una tasa de cambio de 3050COP/USD. Los cálculos realizados se resumen en la tabla 40.

Tabla 42 Valor presente de la alternativa 1

| Año | Total ingresos (USD) | Costos (USD) | Flujo de caja (USD) | Valor presente (USD) |
|------|----------------------|--------------|---------------------|----------------------|
| 2016 | - | \$ 25.808 | -\$ 25.808 | -\$ 25.808 |
| 2017 | \$ 2.332.544 | \$ 17.334 | \$ 2.315.210 | \$ 1.852.168 |
| 2018 | \$ 2.481.031 | \$ 16.847 | \$ 2.464.184 | \$ 1.481.735 |
| 2019 | \$ 2.655.158 | \$ 16.598 | \$ 2.638.560 | \$ 1.185.388 |
| 2020 | \$ 2.858.846 | \$ 16.557 | \$ 2.842.288 | \$ 948.310 |
| 2021 | \$ 2.581.895 | \$ 16.707 | \$ 2.565.188 | \$ 758.648 |

Teniendo en cuenta la información obtenida en la tabla anterior la inversión se recupera en el primer año de funcionamiento manteniendo un margen de ingresos alto.

Se determinó la TIR para la alternativa 1 la cual presentó un valor de 7157%. Este resultado de primera impresión es extremadamente alto, pero su valor se debe a que la inversión que hubiese tenido que implementar es insignificante comparado con el flujo de caja de la alternativa 1. Por último se determinó la relación beneficio costo (B/C), para ello se calculó el valor presente neto tanto para los ingresos como para los costos y se obtuvo una relación de 95,92. El valor presente de los ingresos y los costos se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 43 Valor presente de ingresos y costos para la alternativa 1

| Año | Valor presente ingresos | Valor presente costos |
|--------------------|-------------------------|-----------------------|
| 2016 | \$ - | \$ 25.808,10 |
| 2017 | \$ 1.866.035,19 | \$ 13.866,98 |
| 2018 | \$ 1.587.860,03 | \$ 10.782,27 |
| 2019 | \$ 1.359.440,93 | \$ 8.498,37 |
| 2020 | \$ 1.170.983,18 | \$ 6.781,87 |
| 2021 | \$ 846.035,27 | \$ 5.474,53 |
| Valor total | \$ 6.830.354,60 | \$ 71.212,12 |

De acuerdo a los tres indicadores utilizados se puede afirmar que la alternativa 1 es rentable. La TIR y la relación beneficio costo presentan valores que pueden

parecer desproporcionados, pero como ya se explicó con la TIR estas relaciones están influenciadas por la inversión inicial la cual es muy baja.

5.6.6 Proyección de la evaluación económica para la alternativa 2

Teniendo en cuenta el volumen de producción histórico calculado de los últimos 4 años, se precisó mantener el promedio de producción, es decir 237.250 (doscientos treinta y siete mil doscientos cincuenta) barriles por año. Los precios de las corrientes se proyectaron con base en la inflación. El resumen de los datos se presenta a continuación:

Tabla 44 Precios de las corrientes involucradas en la alternativa 2

| Año | Flujo nafta craqueada liviana (barriles/año) | Precio de la Nafta Craqueada USD/barril | Precio de la Nafta diluyente USD/barril | Precio de la Nafta craqueada liviana USD/barril |
|------|--|---|---|---|
| 2017 | 237250 | \$ 67,8 | \$ 97,9 | \$ 67,8 |
| 2018 | 237250 | \$ 72,1 | \$ 104,2 | \$ 72,1 |
| 2019 | 237250 | \$ 77,2 | \$ 111,5 | \$ 77,2 |
| 2020 | 237250 | \$ 83,1 | \$ 120,0 | \$ 83,1 |
| 2021 | 237250 | \$ 90,0 | \$ 130,0 | \$ 90,0 |

Una vez establecidos los flujos involucrados en la alternativa 2, con sus respectivos precios, se procede a calcular el flujo de caja de la alternativa en un horizonte a 5 años. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 45 Ingresos brutos para la operación de la torre T-4565 alternativa 2

| Año | Ingresos nafta craqueada liviana (USD) | Ingresos nafta diluyente (USD) | Costos nafta craqueada (USD) | Ingresos brutos (USD) |
|------|--|--------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 2017 | \$ 23.237.466,0 | \$ 16.090.810,4 | \$ 32.181.620,9 | \$ 7.146.655,6 |
| 2018 | \$ 24.716.738,8 | \$ 17.115.134,6 | \$ 34.230.269,3 | \$ 7.601.604,2 |
| 2019 | \$ 26.451.439,1 | \$ 18.316.329,9 | \$ 36.632.659,8 | \$ 8.135.109,2 |
| 2020 | \$ 28.480.632,7 | \$ 19.721.447,3 | \$ 39.442.894,7 | \$ 8.759.185,4 |
| 2021 | \$ 30.851.675,6 | \$ 21.363.278,7 | \$ 42.726.557,5 | \$ 9.488.396,8 |

Para realizar la evaluación cuantitativa de la alternativa 2 es necesario determinar los costos que conlleva producir nafta craqueada liviana con un contenido de azufre de 300 ppm.

La alternativa 1 mantenía los costos de operación constantes comparados con los costos de operación habitual. Pero a diferencia de la alternativa 1, la alternativa 2 entra en funcionamiento en el tiempo que la torre no está en operación por lo que es necesario determinar los costos de servicios industriales/procesos (agua de enfriamiento y vapor de agua), operadores, mantenimiento, energía eléctrica e insumos (antioxidante). Para esto se tomó como referencia el estado de operación actual, partiendo de los costos de operación de 1 día de funcionamiento y multiplicando por los días de operación promedio de la alternativa 2 (237,25 días), los cuales se mantienen constantes en el horizonte del proyecto. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 46.

Tabla 46 Costos de operación alternativa 2 (COP)

| Concepto | Costo |
|------------------------|----------------------------|
| Insumos | \$ 3.618.062.500,00 |
| Electricidad | \$ 9.302.857,20 |
| Mantenimiento | \$ 30.000.000,00 |
| Operadores | \$ 52.500.000,00 |
| Servicios industriales | \$ 1.538.092.237,41 |
| Total | \$ 5.247.957.594,61 |

Fuente: Líder de costos del departamento de cracking II, Ecopetrol S.A, 2016

Partiendo de los costos de operación actuales se realizó una proyección de los costos teniendo como factor de incremento la inflación calculada en el horizonte del proyecto. La proyección de precios se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 47 Costos operacionales para la alternativa 2

| Año | Costos operacionales anuales (COP) | TRM (COP/USD) | Costos operacionales anuales (USD) |
|------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|
| 2017 | \$ 5.448.429.574,72 | \$ 3.138,64 | \$ 1.735.920,06 |
| 2018 | \$ 5.795.270.919,18 | \$ 3.434,83 | \$ 1.687.206,38 |
| 2019 | \$ 6.202.001.687,71 | \$ 3.731,02 | \$ 1.662.278,64 |
| 2020 | \$ 6.677.781.541,80 | \$ 4.027,22 | \$ 1.658.163,10 |
| 2021 | \$ 7.233.713.941,30 | \$ 4.323,41 | \$ 1.673.150,52 |

La inversión total para implementar esta alternativa consiste en la sumatoria de la construcción de las dos líneas, es decir, la línea que va como alimentación de nafta craqueada hacia la torre T-4565 más la línea que se dirige desde el fondo de la torre hacia el cabezal de Aceite Liviano de Ciclo (diluyente).

Una vez obtenidos los ingresos y los costos se procedió a determinar el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y la relación beneficio costo (B/C) generado por la implementación de la presente alternativa.

Para determinar el VPN se realizó el flujo de caja y se estableció la tasa de interés en 20% debido a que es una inversión de alto riesgo. Por último se determinó el valor presente de cada uno de los años y se determinó que a la fecha de hoy el VPN para la alternativa 2 es de \$26.955.645 USD, lo que representa en pesos colombianos \$82.214'718.319 COP a una tasa de cambio de 3050COP/USD. Los cálculos realizados se resumen en la tabla 48.

Tabla 48 Valor presente alternativa 2

| Año | Total ingresos (USD) | Costos (USD) | Flujo de caja (USD) | Valor presente (USD) |
|------|----------------------|--------------|---------------------|----------------------|
| 2016 | - | \$ 98.032 | -\$ 98.032 | -\$ 98.032 |
| 2017 | \$ 7.146.656 | \$ 1.735.920 | \$ 5.410.735 | \$ 5.410.735 |
| 2018 | \$ 7.601.604 | \$ 1.687.206 | \$ 5.914.398 | \$ 5.410.735 |
| 2019 | \$ 8.135.109 | \$ 1.662.279 | \$ 6.472.831 | \$ 5.410.735 |
| 2020 | \$ 8.759.185 | \$ 1.658.163 | \$ 7.101.022 | \$ 5.410.735 |
| 2021 | \$ 9.488.397 | \$ 1.673.151 | \$ 7.815.246 | \$ 5.410.735 |

Teniendo en cuenta la información obtenida en la tabla 38 la inversión se recupera en el primer año de funcionamiento manteniendo un margen de ingresos alto.

Se determinó la TIR para la alternativa 2 la cual presentó un valor de 5519%. Este resultado es extremadamente alto, pero sucede lo mismo que en la alternativa 1, su valor se debe a que la inversión que hubiese tenido que implementar es insignificante comparado con el flujo de caja de la alternativa 2.

Por último se determinó la relación beneficio costo (B/C), para ello se calculó el valor presente neto tanto para los ingresos como para los costos y se obtuvo una relación de 4,83. El valor presente de los ingresos y los costos se presenta en la tabla 49.

De acuerdo a los tres indicadores utilizados la alternativa 2 es rentable. La TIR y la relación beneficio costo presentan valores que pueden parecer desproporcionados, pero como ya se explicó con la TIR estas relaciones están influenciadas por la inversión inicial la cual es muy baja. La relación beneficio costo es inferior que la obtenida en la alternativa 1 debido a que presenta costos de operación adicionales.

Tabla 49 Valor presente de ingresos y costos para la alternativa 2
(Cifras dadas en pesos)

| Año | Valor presente ingresos | Valor presente costos |
|--------------------|-------------------------|-----------------------|
| 2016 | \$ - | \$ 91.382 |
| 2017 | \$ 7.146.656 | \$ 1.735.920 |
| 2018 | \$ 7.601.604 | \$ 1.687.206 |
| 2019 | \$ 8.135.109 | \$ 1.662.279 |
| 2020 | \$ 8.759.185 | \$ 1.658.163 |
| 2021 | \$ 9.488.397 | \$ 1.673.151 |
| Valor total | \$ 41.130.951 | \$ 8.508.101 |

5.6.7 Ingresos totales a percibir

Para determinar los ingresos totales a percibir, se usó el VPN realizando un flujo de caja, sumando el flujo de ingresos de las dos alternativas y a este valor se restó la suma de los costos de las alternativas planteadas. Cabe aclarar que la inversión es la realizada en la alternativa 2 por que esta alternativa involucra la inversión total.

La tasa de interés se mantuvo en 20%. Por último se determinó el valor presente de cada uno de los años y se determinó que a la fecha de hoy el VPN del proyecto es de \$18.147.561 USD, lo que representa en pesos colombianos \$55.350'062.250 COP a una tasa de cambio de 3050COP/USD. Los cálculos realizados se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 50 Valor presente del proyecto

| Año | Total ingresos (USD) | Costos (USD) | Flujo de caja (USD) | Valor presente (USD) |
|------|----------------------|-----------------|---------------------|----------------------|
| 2016 | \$ - | \$ 98.032,10 | -\$ 98.032,10 | -\$ 98.032,10 |
| 2017 | \$ 9.479.199,54 | \$ 1.753.253,78 | \$ 7.725.945,76 | \$ 6.180.756,60 |
| 2018 | \$ 10.082.635,49 | \$ 1.704.053,67 | \$ 8.378.581,82 | \$ 4.944.605,28 |
| 2019 | \$ 10.790.267,31 | \$ 1.678.877,03 | \$ 9.111.390,28 | \$ 3.955.684,23 |
| 2020 | \$ 11.618.031,00 | \$ 1.674.720,39 | \$ 9.943.310,61 | \$ 3.164.547,38 |
| 2021 | \$ 12.070.291,58 | \$ 1.689.857,46 | \$10.380.434,11 | \$ 2.531.637,91 |

6. CONCLUSIONES

Se evaluó la viabilidad del aprovechamiento de la nafta craqueada utilizando la capacidad instalada de la torre T-4565, implementando dos alternativas: la primera alternativa realizando mezclas entre nafta craqueada y alquilato total; la segunda alternativa consistió en cargar únicamente nafta craqueada a la torre para disminuir el contenido de azufre de la misma aprovechando la capacidad instalada subutilizada. De los resultados obtenidos se concluye que:

- El coeficiente de determinación (R^2) obtenido para las curvas de destilación ASTM D-86 fue de 0.98, permitiendo afirmar que el modelo de operación de la torre obtenido mediante la simulación en Hysys para el estado de operación actual de la torre fue el adecuado.
- Es viable la mezcla de alquilato total y nafta craqueada para la producción de alquilato liviano, siendo óptima una relación de mezcla hasta del 80% de alquilato total y 20% de nafta craqueada.
- Los factores que limitan la relación de mezclado son la presión de vapor reid (RVP) y el contenido de olefinas en la corriente de alquilato liviano.
- Fue posible aumentar el porcentaje de aprovechamiento de la torre al realizar la mezcla, ya que el corte de destilación del 10% disminuyó su valor habitual en la corriente de alquilato liviano permitiendo de esta manera incrementar el PFE en el producto final (mayor volumen aprovechado).
- Fue posible utilizar la torre T-4565 para dar origen a una corriente de nafta craqueada liviana con un menor contenido de azufre que oscila alrededor de 300 ppm, dependiendo del contenido de compuestos azufrados presentes en la nafta craqueada de alimentación.
- Desde el punto de vista económico, el proyecto es viable, recuperando la inversión en el primer año de operación.

- La alternativa 2 es viable porque se logra disminuir el contenido de azufre de la corriente de alimentación y obtener una corriente de cima con bajo contenido de azufre de acuerdo al máximo permitido como parámetro para su comercialización.
- El contenido de olefinas de la alternativa 2 no es un limitante para su utilización, ya que es posible utilizar un agente antioxidante para su estabilización.
- En el periodo de operación entre 2012 y 2015 se dejaron de percibir activos por un total de \$32.781.530 USD por concepto de la sumatoria de los beneficios económicos de las dos alternativas propuestas.

7. RECOMENDACIONES

Buscando que en trabajos futuros se obtengan mejores resultados se plantea:

- Para la alternativa 1 se recomienda realizar evaluaciones con regla de mezcla cuando las cargas a la unidad de ruptura catalítica sean de mejor calidad y se obtengan naftas craqueadas con menor contenido de olefinas, compuestos azufrados y otras variaciones de composición significativas que podrían permitir un aumento en el volumen de nafta a mezclar y por ende mayor recuperación en el potencial económico del alquilato liviano.
- Se recomienda orientar la unidad de ruptura catalítica UOPII a producir nafta con menor RVP, permitiendo de esta manera aumentar proporcionalmente la relación de nafta craqueada/alquilato total y su respectivo beneficio financiero.
- Implementar adición de antioxidante o inhibidor de olefinas en la línea de nafta craqueada que va como carga a la torre T-4565.
- Continuar realizando experimentaciones piloto para ampliar y perfeccionar el análisis del presente estudio.
- Para la alternativa 2 se recomienda que el contenido de azufre en la nafta craqueada como alimentación de la T-4565 sea menor a 700 ppm para obtener mejores resultados en el fraccionamiento de los compuestos azufrados.

- En caso de implementar la alternativa 2 se debe realizar el estudio del comportamiento hidráulico de los sistemas asociados a la T-4565 para identificar cuellos de botella e implementar las soluciones requeridas.

BIBLIOGRAFÍA

ALBAHRI, Tareq. Structural Group Contribution Method for Predicting the Octane Number of Pure Hydrocarbon Liquids. Industrial & Engineering Chemistry Research. Universidad de Kuwait. Departamento de Ingeniería Química. 2003, pág. 657-662. Kuwait

ALBAHRI, T. A; RIAZI, M.R; ALQATTAN, A. A; Octane Number and Aniline Point of Petroleum Fuels. Universidad de Kuwait. Departamento de Ingeniería Química. Kuwait, 2002.

ALCOBER BOSH, Vicente Juan, Presentación de Resultados I. Universidad Politécnica de Madrid, 2010. Disponible en internet: <http://www-app.etsit.upm.es/departamentos/fis/asignaturas/Teoria%20de%20Errores%20con%20ejemplos.pdf>, consulta 27 de Junio de 2015>.

ALI AL-ASSADY, Qaiser Muslim Abid. Characterization of petroleum fractions. The Iraqi Journal of Mechanical and Material Engineering [online] 2009. Vol. 9, N° 2. [Citado 15 Junio 2015] pág. 223 – 238. Disponible en Internet: <http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&ald=64185>.

ASPENTECH. Bases de simulación. 2010. [Citado el 15 de agosto de 2016]. Disponible en internet: <http://procesosbio.wikispaces.com/file/view/54224008-HYSYS-3-2-Manual-Translation.pdf>

ASTM INTERNATIONAL. Manual on hydrocarbon analysis, sixth edition, 1998, p. 112-114. Drew A. W. Baltimore, United States of North America.

BRANZARU. Introduction to sulfuric acid alkylation unit process design. Stratco Technology Conference. New York, 2001.

BROWN, Theodore L; LEMAY H. Eugene Jr; MURPHY Catherine J; BURSTEN Bruce E; WOODWARD Patrick M. La ciencia central, 12va Edición Cap.18 pag.758 Química del medio ambiente, 2013.

BURNS, Ralph. Fundamentos de Química. Cuarta edición, Pearson. México D.F., 2003

CALIFORNIA ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Eter Metil Terbutílico. Air Resources Board. Sacramento, 2002.

CERUTTI, Alberto Ángel. La refinación del petróleo. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, 2001.

CHEVRON. Motor Gasolines Technical Review. San Ramón, California, 2009. [Citado el 10 de marzo de 2016]. Disponible en internet: <https://www.chevron.com/-/media/chevron/operations/documents/motor-gas-tech-review.pdf>

CHOW PANGTAY, Susana. Petroquímica y sociedad: Fabricación de la gasolina comercial. México D.F. 1998.

ECOPETROL S.A, Gasolina de aviación grado 100, Bogotá D.C: s.n. 2012. Carta Petrolera, Edición 108. Abril-Mayo de 2004.

EL COMERCIO. Falta de combustible limita desarrollo de vuelos en regiones. El comercio [online] febrero de 2015. [21 de septiembre] Disponible en internet:

<http://elcomercio.pe/economia/peru/falta-combustible-limita-desarrollo-vuelos-regiones-noticia-1794000>.

EOLUS AVIATION. Aviación Ultraliviana y experimental, Boletín técnico TB_001-03R2R2. Medellín, 2011.

FAHIM, Mohamed; AL-SAHHAF, Taher; ELKILANI, Amal. Fundamentals of Petroleum Refining. Primera edición, Elsevier Science. Khaldeya: Universidad de Kuwait. Departamento de Ingeniería Química. 2009

GARCÍA GONZÁLEZ, Juan Manuel. La simulación de procesos en Ingeniería Química. En Revista Investigación Científica, vol 4, pag 1-9. Zacatecas: Universidad Autónoma de Zacatecas, 2008.

GARY, James; HANDWERK, Glenn; KAISER, Mark. Petroleum Refining Technology and Economics. Fifth Edition, CRC Press. 2004, pag. 257-262. New York.

GONZALEZ, Strauss. Future Fuels for General Aviation. 1989. West Conshohocken, United States of North America. Disponible en internet: https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/SOURCE_PAGES/STP1048_foreword.pdf

HAMILTON, Alice; REZNIKOFF, Paul y BURNHAM, Grace. Tetraetilo de plomo. Salud Pública de México, vol. 35, núm. 5, septiembre-octubre, 1993, pág. 520-533 Instituto Nacional de Salud Pública Cuernavaca, México.

HOOKEY, Gordon. ASTM Standard D86: "Standard test method for distillation of petroleum products". National transportation safety board, Washington, D.C. 2000.

INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO IMP, Secretaría de Energía SENER, Julio de 2014. Disponible en internet: <http://www.imp.mx/petroleo/?imp=comp>

INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO. Metil-Terc-Butileter. Sevilla, 2011. [Citado el 18 de febrero de 2016]. Disponible en internet: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/LEP%20_VALORES%20LIMITE/Doc_Toxicologica/Ficheros%202011/DLEP%2068%20Metil-terc-butil%C3%A9ter.pdf

MATHPRO INC. Introducción a la refinación del petróleo y producción de gasolina y diésel con contenido ultra bajo de azufre. Bethesda, Maryland: The International Council on Clean Transportation. 2011

MENDOZA RIVERA, Henry y BAUTISTA M., Gloria. Bondad de ajuste en regresión lineal múltiple: Coeficiente de determinación. [Presentación Interactiva]. [Consultado 26 de Junio de 2015]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Disponible en internet: http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2007315/html/un6/cont_02_63.html

MUÑOZ ESPINOSA, Oswaldo Andrés. Coordinación ingeniería de proceso: bases pronostico volumétrico. Unidades de cracking II, Ecopetrol S.A. Barrancabermeja, 2014.

MURRUGARRA PELÁEZ, FIDEL. Obtención de gasolinas de alto octano vía rectificación de nafta craqueada. Trabajo de grado Ingeniero Petroquímico. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas natural y Petroquímica. 2009.

PDVSA. Economía de Refinación, Tomo II. Refinería Puerto La Cruz ,1998.

POMA FLORES, Karim Lidia. Evaluación de la calidad del diesel 2 basado en sus propiedades cetánicas. Trabajo de grado Ingeniero Petroquímico. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería de Petróleo. 2004

REYES HABIB, Daniel José. Evaluación del comportamiento de mezclas de gasolinas sin plomo con etanol utilizando un modelo de programación lineal. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Barcelona: Universidad de Oriente. Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Departamento de Ingeniería Química. 2007.

RIAZI, M. R., Prediction of the Reid vapor pressure of petroleum fuels. Khaldeya, Kuwait: Universidad de Kuwait 2003. [Consultado 25 de Junio de 2015]. pag. 478-479. Disponible en internet: https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/48_1_New%20Orleans__03-03_0574.pdf.

SÁNCHEZ, Francisco y OVIEDO Alfredo. Perspectivas para la producción de alquilato. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Química junto con el Departamento de Química. 1998.

SANTAMARÍA CADENA, Cristian Andrés y PÉREZ MONTERO, Yesid Alfonso. Evaluación del estado de operación actual de la torre rectificadora de alquilato T-4565 (re-run) en la refinería Barrancabermeja mediante su simulación en Aspen Hysys. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015.

SANTO, Marisa; LECUMBERRY, Graciela, El proceso de medición: Análisis y comunicación de datos experimentales. Rio Cuarto: Universidad Nacional de Rio Cuarto. Facultad de Ciencias Exactas, Físico-Químicas y Naturales. Departamento de Física. 2005.

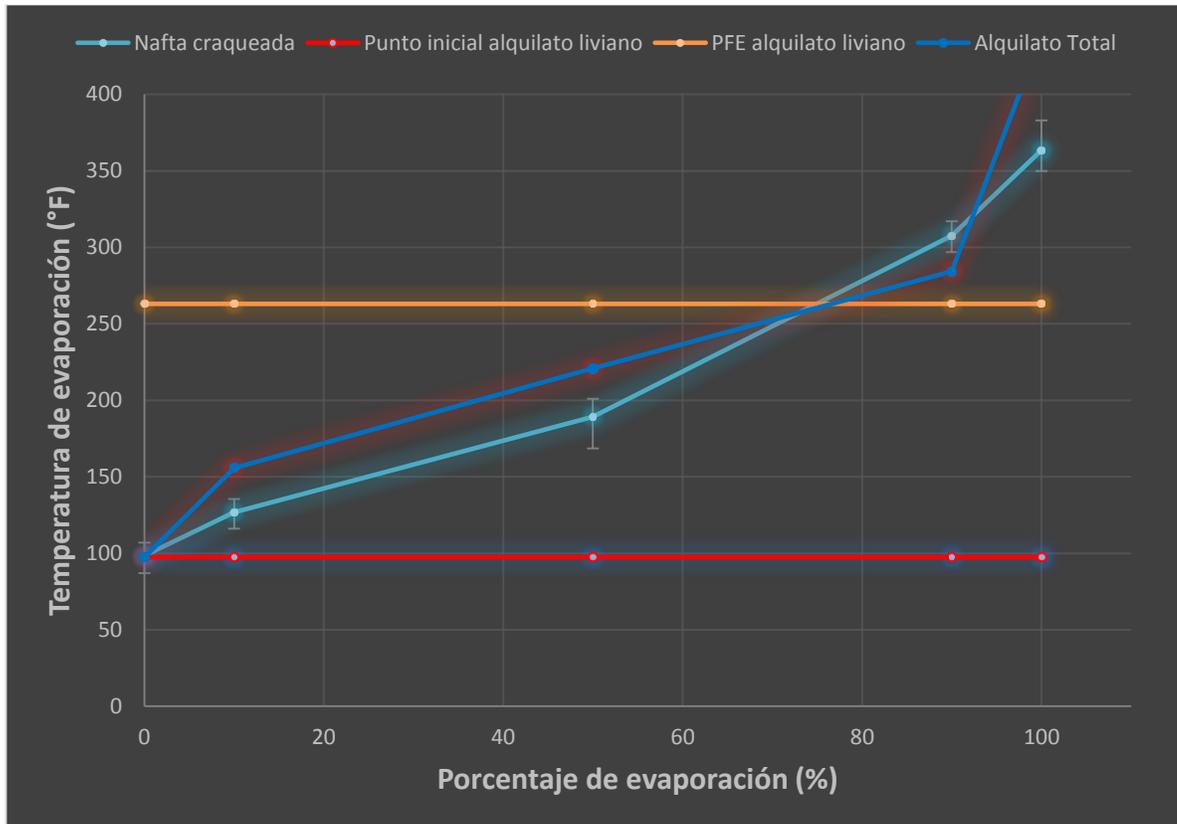
VALVUENA MORENO, Gleidy. Evaluación y seguimiento de la puesta en servicio del proyecto de mezclado para gasolinas y combustóleos en la Gerencia Complejo Barrancabermeja. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. 2005.

WUITHIER, Pierre. El Petróleo Refino y Tratamiento Químico, Ediciones CEPESA, 1971, pág. 15-19. Madrid.

ANEXOS

ANEXO A. ESTABLECIMIENTO DEL POTENCIAL DE LA NAFTA CRAQUEADA COMO ALQUILATO LIVIANO

El establecimiento del potencial de la nafta craqueada hace parte fundamental para determinar la viabilidad de la alternativa 1. En este anexo se grafica la curva de destilación de la nafta craqueada procesando 30 pruebas ASTM D-86 Vs Alquilato Total junto con el punto inicial y el punto final de ebullición de referencia de la curva de destilación del alquilato liviano.



ANEXO B. DISEÑO DE LA TORRE DE RECTIFICACIÓN T-4565.

Para el cálculo de las simulaciones realizadas se necesitó establecer las condiciones y parámetros de diseño necesarios para lograr que las corridas presenten la mejor aproximación a los resultados reales, para cumplir este propósito se presenta un resumen de los parámetros de diseños y condiciones de operación empleados para la simulación. Estos datos se presentan en la Tabla B 1

Tabla B 1 Parámetros de diseño y condiciones de operación de la torre

| TORRE 4565 (re-run) | | | | |
|----------------------------|--------------------|----------------------------------|---------------------|--------------|
| | | Característica | Unidad | Valor |
| | | Flujo de Entrada | Barriles/día | 2000 |
| | | Flujo de Salida del Tope | Barriles/día | 1800 |
| | | Flujo de Salida del Fondo | Barriles/día | 200 |
| | | Número de Platos | Platos | 20 |
| | | Diámetro de la Torre | ft | 3,5 |
| | | Altura de la Torre | ft | 54,17 |
| | | Espacio entre platos | ft | 2 |
| | Condensador | Caída de Presión | psig | 17 |
| | | Temperatura | °F | 251 |
| | | Presión de Entrada | psia | 8,696 |
| | | Diámetro | ft | 80 |
| | | Longitud | ft | 156 |
| | Rehervidor | Caída de Presión | psig | 1 |
| | | Temperatura | °F | 399,8 |
| | | Presión de Entrada | psia | 30,7 |
| | | Diámetro | ft | 20 |
| | | Longitud | ft | 39 |
| Platos | 1 | Presión | psia | 25,7 |
| | | Temperatura | °F | 251,5 |
| | 3 | Presión | psia | 26,1 |

APROVECHAMIENTO DE NAFTA CRAQUEADA UTILIZANDO LA CAPACIDAD INSTALADA DE LA T-4565 EN LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA

| | | | | |
|--|-----------|--------------------|-------------|--------------|
| | | Temperatura | °F | 256,3 |
| | 5 | Presión | psia | 26,4 |
| | | Temperatura | °F | 258,3 |
| | 6 | Presión | psia | 26,8 |
| | | Temperatura | °F | 260,1 |
| | 8 | Presión | psia | 27,2 |
| | | Temperatura | °F | 262,2 |
| | 10 | Presión | psia | 27,5 |
| | | Temperatura | °F | 277,8 |
| | 11 | Presión | psia | 27,9 |
| | | Temperatura | °F | 286,8 |
| | 13 | Presión | psia | 28,2 |
| | | Temperatura | °F | 297,1 |
| | 15 | Presión | psia | 28,6 |
| | | Temperatura | °F | 311,6 |
| | 16 | Presión | psia | 29 |
| | | Temperatura | °F | 331,2 |
| | 18 | Presión | psia | 29,3 |
| | | Temperatura | °F | 353,6 |
| | 20 | Presión | psia | 29,7 |
| | | Temperatura | °F | 375,2 |

ANEXO C. VALIDACIÓN DE LOS DATOS DE OPERACIÓN HABITUAL DE LA TORRE

Los cálculos realizados para validar los datos de operación actual, se realizaron utilizando la fórmula 4 para el cálculo del error cuadrático medio ($e_r\%$). Por su parte para el cálculo del coeficiente de determinación (R^2), se realizó con base en las ecuaciones 5, 6 y 7. El resumen de los cálculos realizados se muestra en la Tabla C 2.

Tabla C 2 Cálculos validación de los datos de operación de la T-4565

| Prueba | Componente | TBP experimental | TBP HYSYS | Desviación | Numerador | Denominador | R^2 | $e_r\%$ |
|----------|---------------------------|------------------|-----------|-------------|----------------|-----------------|-------|---------|
| Junio 3A | Pto inicial de ebullición | 95,7 | 79,76 | 15,94 | 254,08 | 13222,69 | 0,96 | 16,66% |
| | 10%vol evaporado | 155,5 | 145,19 | 10,31 | 106,39 | 2456,63 | | 6,63% |
| | 40%vol evaporado | 211,8 | 209,21 | 2,59 | 6,71 | 209,10 | | 1,22% |
| | 50%vol evaporado | 216,5 | 219,50 | 3,00 | 8,98 | 612,43 | | 1,38% |
| | 90%vol evaporado | 228,6 | 245,75 | 17,15 | 294,24 | 2601,36 | | 7,50% |
| | Pto final de ebullición | 260,4 | 279,24 | 18,84 | 354,85 | 7138,15 | | 7,23% |
| | Promedio | 194,75 | | Suma | 1025,26 | 26240,37 | | |
| Junio 3B | Pto inicial de ebullición | 95,7 | 87,28 | 8,42 | 70,98 | 12105,46 | 0,98 | 8,80% |
| | 10%vol evaporado | 162,3 | 145,83 | 16,47 | 271,12 | 2648,72 | | 10,15% |
| | 40%vol evaporado | 213,1 | 203,05 | 10,05 | 100,98 | 33,07 | | 4,72% |
| | 50%vol evaporado | 217,2 | 215,84 | 1,36 | 1,85 | 343,75 | | 0,63% |
| | 90%vol evaporado | 229,3 | 234,70 | 5,40 | 29,13 | 1398,55 | | 2,35% |
| | Pto final de ebullición | 266,2 | 273,04 | 6,84 | 46,74 | 5736,05 | | 2,57% |
| | Promedio | 197,3 | | Suma | 520,80 | 22265,61 | | |
| Junio 20 | Pto inicial de ebullición | 100,80 | 101,83 | 1,03 | 1,05 | 8868,80 | 0,99 | 1,02% |
| | 10%vol evaporado | 153,00 | 153,65 | 0,65 | 0,42 | 1793,91 | | 0,42% |
| | 40%vol evaporado | 209,10 | 204,79 | 4,31 | 18,61 | 77,19 | | 2,06% |
| | 50%vol evaporado | 216,00 | 215,71 | 0,29 | 0,09 | 388,32 | | 0,14% |
| | 90%vol evaporado | 230,00 | 238,74 | 8,74 | 76,31 | 1826,35 | | 3,80% |
| | Pto final de ebullición | 267,10 | 274,48 | 7,38 | 54,41 | 6158,52 | | 2,76% |
| | Promedio | 196,00 | | Suma | 150,89 | 19113,10 | | |

Continuación Tabla C 2

| | | | | | | | | |
|----------|---------------------------|---------------|--------|-------------|----------------|-----------------|------|--------|
| Julio 16 | Pto inicial de ebullición | 96,40 | 83,43 | 12,97 | 168,13 | 12814,16 | | 13,45% |
| | 10%vol evaporado | 156,70 | 153,96 | 2,74 | 7,52 | 1821,25 | | 1,75% |
| | 40%vol evaporado | 211,50 | 202,76 | 8,74 | 76,43 | 37,51 | | 4,13% |
| | 50%vol evaporado | 216,50 | 214,78 | 1,72 | 2,94 | 329,45 | 0,98 | 0,79% |
| | 90%vol evaporado | 230,40 | 235,37 | 4,97 | 24,71 | 1500,61 | | 2,16% |
| | Pto final de ebullición | 268,30 | 277,13 | 8,83 | 78,04 | 6480,35 | | 3,29% |
| | Promedio | 196,63 | | Suma | 357,77 | 22983,32 | | |
| Julio 22 | Pto inicial de ebullición | 98,40 | 89,34 | 9,06 | 82,17 | 11320,56 | | 9,21% |
| | 10%vol evaporado | 159,40 | 153,89 | 5,51 | 30,31 | 1750,48 | | 3,45% |
| | 40%vol evaporado | 208,00 | 202,01 | 5,99 | 35,83 | 39,45 | | 2,88% |
| | 50%vol evaporado | 214,20 | 212,90 | 1,30 | 1,69 | 294,65 | 0,98 | 0,61% |
| | 90%vol evaporado | 228,80 | 246,36 | 17,56 | 308,48 | 2563,43 | | 7,68% |
| | Pto final de ebullición | 265,60 | 274,92 | 9,32 | 86,87 | 6270,63 | | 3,51% |
| | Promedio | 195,73 | | Suma | 545,36 | 22239,19 | | |
| Julio 24 | Pto inicial de ebullición | 95,50 | 87,77 | 7,73 | 59,71 | 10974,76 | | 8,09% |
| | 10%vol evaporado | 152,60 | 152,70 | 0,10 | 0,01 | 1586,32 | | 0,07% |
| | 40%vol evaporado | 204,40 | 202,14 | 2,26 | 5,12 | 92,22 | | 1,11% |
| | 50%vol evaporado | 211,80 | 212,79 | 0,99 | 0,98 | 410,37 | 0,95 | 0,47% |
| | 90%vol evaporado | 228,00 | 253,74 | 25,74 | 662,68 | 3746,58 | | 11,29% |
| | Pto final de ebullición | 262,90 | 282,89 | 19,99 | 399,76 | 8165,07 | | 7,61% |
| | Promedio | 192,53 | | Suma | 1128,27 | 24975,32 | | |
| Julio 25 | Pto inicial de ebullición | 97,90 | 107,42 | 9,52 | 90,59 | 7187,99 | | 9,72% |
| | 10%vol evaporado | 145,80 | 150,03 | 4,23 | 17,90 | 1778,21 | | 2,90% |
| | 40%vol evaporado | 203,00 | 201,54 | 1,46 | 2,14 | 87,16 | | 0,72% |
| | 50%vol evaporado | 210,90 | 213,47 | 2,57 | 6,59 | 452,27 | 0,96 | 1,22% |
| | 90%vol evaporado | 232,70 | 245,63 | 12,93 | 167,14 | 2854,59 | | 5,56% |
| | Pto final de ebullición | 262,90 | 285,08 | 22,18 | 491,99 | 8626,84 | | 8,44% |
| | Promedio | 192,20 | | Suma | 776,35 | 20987,05 | | |

Continuación Tabla C 2

| | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------------|---------------|--------|-------------|---------------|-----------------|------|--------|
| Julio 26 | Pto inicial de ebullición | 98,40 | 99,87 | 1,47 | 2,15 | 8543,85 | | 1,49% |
| | 10%vol evaporado | 146,00 | 146,33 | 0,33 | 0,11 | 2113,12 | | 0,23% |
| | 40%vol evaporado | 208,60 | 198,87 | 9,73 | 94,74 | 43,12 | | 4,67% |
| | 50%vol evaporado | 216,90 | 209,44 | 7,46 | 55,66 | 293,77 | 0,96 | 3,44% |
| | 90%vol evaporado | 232,70 | 244,38 | 11,68 | 136,53 | 2712,80 | | 5,02% |
| | Pto final de ebullición | 251,20 | 276,60 | 25,40 | 645,28 | 7106,88 | | 10,11% |
| | Promedio | 192,30 | | Suma | 934,47 | 20813,54 | | |
| Julio 27 | Pto inicial de ebullición | 97,90 | 97,65 | 0,25 | 0,06 | 9324,72 | | 0,25% |
| | 10%vol evaporado | 151,70 | 142,12 | 9,58 | 91,74 | 2713,87 | | 6,31% |
| | 40%vol evaporado | 206,20 | 200,23 | 5,97 | 35,65 | 36,15 | | 2,90% |
| | 50%vol evaporado | 213,80 | 213,03 | 0,77 | 0,60 | 353,87 | 0,99 | 0,36% |
| | 90%vol evaporado | 228,60 | 237,92 | 9,32 | 86,83 | 1909,81 | | 4,08% |
| | Pto final de ebullición | 267,10 | 267,48 | 0,38 | 0,14 | 5367,44 | | 0,14% |
| | Promedio | 194,22 | | Suma | 215,02 | 19705,86 | | |

ANEXO D. DETERMINACIÓN DEL RON Y EL MON

Para determinar el RON de una corriente, primero es necesario determinar el RON de cada uno de los compuestos. Para esto se partió de la siguiente tabla:

Tabla D 3 Grupo de contribución para la estimación del RON

Fuente: Ali-Assady, 2009

| HC type | serial no. | group | (RON) _i |
|------------------------|------------|---|--------------------|
| paraffins | 1 | -CH ₃ | 0.459 |
| | 2 | -C ₂ H ₅ (branch) | 0.948 |
| | 3 | >CH ₂ | 0.680 |
| | 4 | α->CH- | -0.139 |
| | 5 | β->CH- | -0.362 |
| | 6 | δ->CH- | -0.358 |
| | 7 | α->C< | -1.357 |
| | 8 | β->C< | -1.828 |
| olefins | 9 | =CH- | -0.078 |
| | 10 | =CH- (C# ≥ 5) ^a | -0.660 |
| | 11 | α->C≡ | -0.811 |
| | 12 | β->C≡ | -0.6441 |
| | 13 | =CH ₂ | 0.119 |
| | 14 | =C= | 2.693 |
| | 15 | =CH- (cis) | -0.409 |
| | 16 | =CH- (trans) | -0.387 |
| cyclic ^b | 17 | =CH | -1.267 |
| | 18 | =C- | 0.603 |
| | 19 | >CH ₂ | 0.400 |
| | 20 | >CH- | 0.122 |
| | 21 | >CH- (o) | -0.330 |
| | 22 | >C< | -0.800 |
| | 23 | =CH- | -0.064 |
| | 24 | >C= | -0.356 |
| | 25 | correction for C ₃ ring | -1.217 |
| | 26 | correction for C ₄ ring | 1.117 |
| aromatics ^b | 27 | correction for C ₇ ring | 0.75 |
| | 28 | correction for C ₈ ring | -0.468 |
| | 29 | =CH- | -0.202 |
| | 30 | >C= | 0.193 |
| | 31 | >C= (o) | -0.337 |
| | 32 | >C= (m) | -0.959 |
| | 33 | >C= (p) | -0.498 |

^a For a carbon atom that is fifth or higher order along the hydrocarbon chain. α-, β-, and δ- refer to the second, third, and fourth positions on the HC chain, respectively. ^b Groups 19-29 are all nonfused.

Fuente: Albahri, 2002

El cálculo del RON de un compuesto tiene relación con la estructura de la molécula de cada compuesto (Albahri, 2002), es así que se determinó la siguiente ecuación para el cálculo del RON:

$$RON = 104.8 - 5.395 * \sum RON_i + 6.532 * \sum RON_i^2 - 5.165 * \sum RON_i^3 + 0.6189 * \sum RON_i^4$$

Donde:

$\sum RON_i$ = es la sumatoria de todos los grupos involucrados en una molécula.

Para que quede más claro cómo se calcula el RON para una molécula, se presenta cómo se determinó el RON para el tolueno. Primero se determinó el $\sum RON_i$ de la siguiente manera:

El compuesto presenta:

- 1 metil = numeral 1 en la tabla que equivale a 0.459
- 5 enlaces dobles aromáticos = numeral 29 en la tabla equivale a -0.202
- 1 enlace doble aromático con ramificación = numeral 30 en la tabla equivale a 0.193

Una vez llevada a cabo la sumatoria se obtuvo un valor de -0.358, que reemplazado en la ecuación anterior da 107.8 de RON.

Para determinar el octanaje de una corriente es necesario calcular primero el octanaje de cada grupo de compuestos (parafinas, isoparafinas, aromáticos, naftenos y olefinas) y luego se multiplica por la composición en porcentaje en volumen de acuerdo a la siguiente expresión:

$$RON = V_p * RON_p + V_I * RON_I + V_A * RON_A + V_N * RON_N + V_A * RON_A$$

Para que quede más claro cómo se calcula el RON para una mezcla, se presenta como se determinó el RON para el alquilato liviano en el caso base. Los datos que se usaron para el cálculo se presentan en la tabla A 4.

Reemplazando los valores de la tabla A 4 en la anterior ecuación se tiene:

$$RON = 7.7\% * 83.13 + 79.47\% * 96.4 + 12.4\% * 107.82 + 0\% * 81.58 + 0.1\% * 103.86\% = 96.8$$

Tabla D 4 RON para cada grupo de compuestos y porcentaje de composición volumétrica

| GRUPO | RON | % Vol |
|---------------------|---------------|--------------|
| Parafinas | 83,13 | 7,7% |
| Isoparafinas | 96,40 | 79,7% |
| Aromáticos | 107,82 | 12,4% |
| Naftenos | 81,58 | 0,0% |
| Olefinas | 103,86 | 0,1% |

Una vez determinado en RON, el MON se calcula de manera muy fácil, Albahri junto con Riazi y Alqattan proponen una correlación entre estos dos parámetros usando la siguiente ecuación:

$$MON = 22.5 + 0.83 * RON - 20 * SG$$

Donde SG es la gravedad específica de la corriente a 15°C, la cual para la corriente de alquilato liviano en el caso base es de 0.69. Por último se reemplaza el RON y la gravedad específica en la ecuación obteniendo un valor de 89.12.

ANEXO E. CÁLCULOS DE LA INCORPORACIÓN DE NAFTA CRAQUEADA ESTABLECIENDO REGLA DE MEZCLAS

El flujo de alquilato total permanece constante en cada uno de los cortes, manteniendo el flujo de la simulación que se ajusta más al comportamiento real, el cual se estableció en 1337 barril/día. La determinación del flujo de nafta craqueada se realizó utilizando una regla de proporcionalidad. La expresión general de la ecuación se presenta a continuación:

$$F_{Nafta\ craqueada} = \frac{F_{Alquilato\ total} \times \%Nafta\ Craqueada}{\%Alquilato\ total}$$

Donde:

- $F_{Nafta\ Craqueada}$ = flujo de nafta craqueada
- $F_{Alquilato\ total}$ = flujo de alquilato total
- $\%Nafta\ Craqueada$ = porcentaje de nafta craqueada
- $\%Alquilato\ total$ = porcentaje de alquilato total.

El flujo de alimentación utilizado es igual a la suma del flujo de alquilato total más el flujo de nafta craqueada, estos datos se tomaron de la simulación.

El porcentaje de aprovechamiento de la corriente de alimentación a una temperatura establecida como referencia de 270°F determina el corte en volumen de flujo de alquilato liviano por medio de una interpolación lineal en los cortes de evaporación D-86 determinados por el simulador, Por ejemplo para la mezcla de 90% de alquilato total y 10% de nafta craqueada, se determinó el rango de evaporación donde se encuentra 270°F, el cual se presentan en la Tabla E 1.

Tabla E 5 Rango de evaporación para determinar el porcentaje de aprovechamiento

| Porcentaje de evaporación | Temperatura de acuerdo a la norma ASTM D-86 |
|---------------------------|---|
| 85% | 269,98°F |
| 90% | 320,63°F |

Aplicando interpolación lineal se determinó que el porcentaje de aprovechamiento es de 85%, por lo tanto al multiplicar este porcentaje por el flujo de alimentación (1337barril/día) se obtiene que el flujo de alquilato liviano que se obtiene por la cima es de 1136barril/día.

Por último el reflujo se determinó a partir de la base de datos históricos de la operación en el caso base, obteniendo una relación de reflujo de 4,15. Al dividir el flujo de alquilato liviano entre este factor se obtiene el valor del reflujo de la torre.

ANEXO F. CÁLCULO DE LA ADICIÓN DE TETRAETILO DE PLOMO (TEL)

El cálculo de la adición de Tetraetilo de Plomo (TEL) se realizó de acuerdo a los siguientes pasos:

- a) **Determinación de los puntos en escala de octanaje del Alquilato Liviano de la mezcla para alcanzar el octanaje 130 del Avgas:** para determinar los puntos en escala de octanaje del Alquilato Liviano producto que le hacen falta para alcanzar el octanaje 130 requerido como Avgas, se restó a dicho valor (130) el valor del octanaje obtenido del Alquilato Liviano Producto. Por ejemplo para la corriente de alquilato liviano producto de la mezcla de 90% de alquilato total y 10% de nafta craqueada, el octanaje es de 92.71 por lo que le hacen falta 37.29 puntos para alcanzar los 130.
- b) **Corrección por azufre:** independiente de la composición de azufre, la presencia de tiofenos disminuye en un punto el octanaje, por lo que es necesario sumar un punto a los que le hicieron falta para alcanzar el octanaje 130.
- c) **Corrección de predicción:** debido a que los modelos de cálculo de las propiedades presentan un 2% de error, se tomó una compensación sumando un 2% adicional al valor calculado en el literal a.
- d) **Sumatoria:** luego, se suman los valores obtenidos en cada uno de los pasos anteriores. Para la mezcla 90%-10% se obtuvo un valor de 39.04.
- e) **Cálculo del TEL a adicionar:** para determinar este valor se suma a 100 la sumatoria del apartado d. Para la mezcla 90%-10% se obtuvo un valor de 139.04, por lo tanto de acuerdo a la tabla 15 es necesario adicionar 0.58 mL TEL/L. Este mismo procedimiento se llevó a cabo para las demás mezclas.