

**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA MAXIMIZACIÓN DE CARGA DE
ISOBUTANO A LA NUEVA PLANTA DE ALQUILACIÓN DE LA GERENCIA
REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA, ECOPELROL S.A**

LUZ DARY MILENA GRASS LUNA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2015

**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA MAXIMIZACIÓN DE CARGA DE
ISOBUTANO A LA NUEVA PLANTA DE ALQUILACIÓN DE LA GERENCIA
REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA, ECOPETROL S.A**

LUZ DARY MILENA GRASS LUNA

**Trabajo de Grado presentado para optar al título de
Ingeniero Químico**

MODALIDAD PRÁCTICA EMPRESARIAL

DIRECTOR:

CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA

Ingeniero Químico, M. Sc.

TUTOR ECOPETROL S.A

Luis Fernando Puentes Pedraza

Ingeniero Químico, M. Sc.

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

2015

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios, por llenar mi vida de paz y felicidad y muchas bendiciones, porque ha sido mi fortaleza y mi refugio, porque con su respaldo me ha dado grandes triunfos y hoy me permite disfrutar de un galardón más. A mis papás Israel Grass y Betsabé Luna, quienes con mucho esfuerzo y sudor han luchado por sacarme adelante, me han inculcado grandes valores y me han dado una educación maravillosa y ejemplar. Ustedes me han enseñado a enfrentar la vida y las dificultades con sagacidad y valentía. Creo que no me alcanzará la vida para retribuirles todo lo que me han dado y enseñado. Los amo con todo mi corazón.

A mis hermanos Maria Smith y Diofer por estar siempre con migo, desde pequeños, para jugar, pelear, trabajar y aprender a defendernos en la vida. Porque siempre han estado pendientes de mí, apoyándome y dándome fuerzas para seguir adelante, gracias por todos los momentos compartidos. Los amo. A mi amigo y confidente, quien llegó hace siete años a mi vida para quedarse, Fabian Beltrán, has sido mi apoyo incondicional, a pesar de la distancia siempre has estado pendiente de mí, dándome ánimo, despertándome en las mañanas para estudiar y colaborándome tanto que no sé cómo pagarte todo lo que has hecho por mí. Te amo.

A mi amigo Marlon a quien quiero y admiro muchísimo, nos conocimos en primer semestre, en Cálculo I, y cada semestre ésta amistad fue tomando fuerzas, vimos la mayoría de materias juntos, estudiamos, trasnochamos, reímos, dormíamos en el metro línea y compartimos miles de momentos agradables. Gracias por tu paciencia, tus explicaciones, tu ayuda y tu compañía durante todo este tiempo. A Nayis mi primera amiga en la U, a Dieguito que se nos fue para Francia y a quien admiro mucho, a Franchis, Nata, Camilo, Gisse, Daniel, Wilberth, Enrique,

ustedes fueron mis primeras amistades y compañeros de estudio. A las primas, July y Jised, con quienes compartí durante casi toda la carrera, estudiando fuertemente y compartiendo momentos únicos, incluso viviendo durante cinco meses bajo un mismo techo. A Dani, mi amiga desde el colegio y con quien he podido experimentar lo que es una amistad sincera...a todos ustedes los quiero muchísimo y los llevo siempre en mi corazón.

Luz Dary Milena Grass Luna

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por sus múltiples bendiciones, por darme la oportunidad de estudiar una carrera profesional y por cumplir cada anhelo de mi corazón.

A mis padres, por su esfuerzo, dedicación y el apoyo incondicional que me han dado durante toda mi etapa de formación académica.

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarme la oportunidad de formarme profesionalmente con valores éticos y morales.

A la planta docente de la Escuela de Ingeniería Química, por contribuir en mi proceso de formación académica e integral con sus conocimientos y enseñanzas.

A Ecopetrol S.A por abrirme las puertas para el desarrollo de mi práctica Empresarial, una experiencia que dejó un aprendizaje significativo en mi formación profesional.

De manera especial agradezco al Ingeniero Juan Carlos Arias Molina, por su colaboración incondicional, por dedicarme parte de su tiempo para apoyarme y orientarme en el desarrollo del trabajo asignado.

A la Coordinación de Programación de la Producción, por su agradable acogida, por sus múltiples enseñanzas en lo profesional y en lo personal, por brindarme la ayuda y apoyo necesario para el desarrollo del proyecto. Agradezco al Ingeniero Jhon Jairo Castillo por toda su colaboración, por los miles de favores, por sus regaños que también me dejaron enseñanzas y porque con su ejemplo me permitió entender que quien se propone llegar lejos, puede lograrlo con esfuerzo, dedicación y constancia.

Al profesor Crisóstomo Barajas Ferreira, por su tiempo, su orientación, sus correcciones y su ayuda para la elaboración de éste libro.

A mis compañeros de estudio y a todas aquellas personas que de alguna manera contribuyeron en el desarrollo de éste trabajo, que con su colaboración, su conocimiento y su ayuda hicieron posible la realización de éste proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	16
1. MARCO TEÓRICO	17
1.1 FUNCIONAMIENTO DE LAS UNIDADES TOPPING.....	17
1.2 FUNCIONAMIENTO DE LAS UNIDADES CRACKING	18
1.3 FUNCIONAMIENTO DE LA NUEVA PLANTA DE ALQUILACIÓN (NPA)	20
1.3.1 Problemática en el sistema de carga de la Unidad	22
2. OBJETIVOS	24
2.1 OBJETIVO GENERAL	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
3. METODOLOGÍA.....	25
3.1 EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA NPA, SISTEMA DE GLP Y SISTEMA DE NAFTA VIRGEN.....	25
3.2 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS.....	26
3.3 SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS PLANTEADAS.....	26
3.4 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE ALTERNATIVAS.....	27
3.4.1 Evaluación técnica	27
3.4.2 Evaluación económica	28
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	29
4.1 EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA NPA Y SISTEMA DE GLP Y NAFTA VIRGEN	29
4.2 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS	31
4.3 SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS	33
4.4 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA.....	35

4.4.1 Evaluación técnica	35
4.4.2 Evaluación económica	41
5. CONCLUSIONES	44
6. RECOMENDACIONES.....	46
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXOS	51

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo de las unidades topping.....	17
Figura 2. Diagrama de flujo de las unidades cracking	19
Figura 3. Diagrama de flujo de la nueva planta de alquilación	20
Figura 4. Esquema de la metodología empleada para el desarrollo de la práctica empresarial.	25
Figura 5. Corrientes de entrada y salida de la NPA.....	29
Figura 6. Variación de relación isobutano/olefinas de GLP de cracking (2002-2014).....	29
Figura 7. Cálculo del NPSH disponible, corriente de cima de torre T-2004 (P-2032 C/D)	38
Figura 8. Cálculo del NPSH disponible, corriente de fondo de torre T-2004 (P-2012 C/D):	39

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Torres unidades topping	18
Tabla 2. Torres depropanizadoras de cracking.....	20
Tabla 3. Producción de GLP de cracking	30
Tabla 4. Resultados simulación Alternativa 1, PRO II 9.1	34
Tabla 5. Resultados simulación Alternativa 3, PRO II 9.1	34
Tabla 6. Resultados simulación Alternativa 5, PRO II 9.1	35
Tabla 7. Condiciones de rendimiento de bombas P-2032 C/D y P-2012 C/D	39
Tabla 8. Requisitos para implementación de alternativas 3 y 5	40
Tabla 9. Producción de alquilato con las alternativas 3 y 5.....	41
Tabla 10. Resultados del análisis económico realizado para las alternativas 3 y 5	42

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Diagrama General de la Refinería de Barrancabermeja.....	51
ANEXO B. Esquemas de proceso de alternativas propuestas	52
ANEXO C. Destilación D-86 nafta virgen	55
ANEXO D. Análisis PIANO Naftas (grupo parafinas e isoparafinas)	56
ANEXO E. Cromatografía muestra de corriente de cima de torre T-171, 10/10/2014.....	57
ANEXO F. Composición volumétrica de GLP de Cracking	58
ANEXO G: Análisis hidráulico para facilidades nuevas y existentes	59
ANEXO H. Cálculo del NPSH disponible	60
ANEXO I: Simulación de rehervidor de torre T-2004, E-2020.....	61
ANEXO J: Precios de venta de productos obtenidos en las alternativas 3 y 5. ...	62
ANEXO K: Ingreso anual de productos obtenidos en las alternativas 3 y 5.	63

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO PARA LA MAXIMIZACIÓN DE CARGA DE ISOBUTANO A LA NUEVA PLANTA DE ALQUILACIÓN DE LA GERENCIA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA, ECOPEPETROL S.A.

AUTOR: LUZ DARY MILENA GRASS LUNA

PALABRAS CLAVE: ALQUILACIÓN, ISOBUTANO, OLEFINAS, GLP, ALQUILATO.

DESCRIPCIÓN:

La Nueva Planta de Alquilación (NPA) de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja fue puesta en servicio en Noviembre del 2002 y fue diseñada para producir 4500 barriles por día de aquilato total, el cual se obtiene mediante la reacción de alquilación en la que reacciona olefinas con isobutano en presencia de ácido sulfúrico como catalizador. Este es un producto de alto valor comercial, no obstante actualmente la planta opera con un bajo factor de utilización, produciendo tan solo alrededor de 2000 barriles por día de alquilato total.

La razón principal de ésta baja producción se debe a que las corrientes de carga que se establecieron en el diseño de la planta, no cumplen con los parámetros de calidad, específicamente por el bajo contenido de isobutano presente en éstas corrientes, el cual se requiere que sea alto en relación con el contenido de olefinas, para que se dé la reacción.

El trabajo presentado en la práctica empresarial tuvo como propósito realizar un estudio técnico-económico de alternativas para maximizar la carga de isobutano a la NPA, aumentando la producción de alquilato para generar mayores beneficios económicos a la organización.

Las alternativas planteadas fueron simuladas con el fin de identificar y seleccionar aquellas que entregan mayor potencial de isobutano, posteriormente se compararon los beneficios económicos de las alternativas mediante un análisis de riesgo financiero conocido como factor J. Obteniendo como resultado que la Alternativa 5 genera mayores ganancias con menor inversión y con mayor facilidad de implementación, por lo cual fue seleccionada para elaborar el documento de Ingeniería Conceptual, el cual fue entregado a la Coordinación de Ingeniería de Proceso para el posterior desarrollo de Ingeniería básica y de detalle.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira, Ingeniero Químico.

ABSTRACT

TITLE: TECHNO-ECONOMIC STUDY FOR MAXIMIZATION OF ISOBUTANE LOAD TO THE NEW ALKYLATION PLANT OF BARRANCABERMEJA REFINERY MANAGEMENT, ECOPETROL S.A.

AUTHOR: LUZ DARY MILENA GRASS LUNA

KEYWORDS: ALKYLATION, ISOBUTANE, OLEFINS, GPL, ALKYLATE.

DESCRIPCIÓN:

The New Alkylation Plant (NAP) of Barrancabermeja Refinery was commissioned in November of 2002 and was designed to produce 4,500 barrels of total alkylate per day, which is obtained by the alkylation reaction where olefins react with isobutane in the presence of sulfuric acid as catalyst. This is a product of high commercial value, nevertheless currently the plant operates with a low utilization factor, producing only about 2,000 barrels of total alkylate per day.

The main reason for this low production is that the load currents that were established in the design of the plant does not meet the quality parameters, specifically because of the low content of isobutane present in these streams, which is required to be high relative to the olefin content in the reaction zone.

The paper submitted in business practice had the aim of implement a techno-economic study of alternatives to maximize the load of isobutane to the NPA, increasing the production of alkylate to generate greater economic benefits to the organization.

The proposed alternatives are simulated to identify and select those which deliver the greatest potential of isobutane, afterwards the economic benefits of the alternatives were compared using an analysis of financial risk known as J factor. As a result was obtained that alternative 5 generates higher profits with less investment and ease of implementation, reason why it was chosen to elaborate the Conceptual Engineering document, which was given to this coordination for the further development of Basic and Detailed Engineering.

¹ Degree Project

¹ Physico-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: M.Sc. Crisóstomo Barajas Ferreira, Ingeniero Químico.

INTRODUCCIÓN

La Empresa Colombiana de Petróleos ECOPETROL fue creada en 1948 con una capacidad de procesamiento de crudo de 1500 barriles [1]. Con el paso del tiempo se han construido nuevas plantas y se ha aumentado la capacidad de procesamiento de crudo, concentrando sus esfuerzos principalmente en la producción de combustibles, tales como gasolinas, diésel, ACPM y jet para satisfacer la demanda nacional (ver Anexo A). Actualmente, la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB) procesa alrededor de 240.000 barriles por día (BPD) de crudo de varias calidades. El área de refinación produce principalmente gasolinas y destilados. El área de petroquímica elabora productos petroquímicos tales como bases lubricantes, parafinas, aromáticos y polietilenos. El área de ruptura catalítica, Catalytic Cracking, se carga principalmente de gasóleos para producir gas licuado del petróleo (GLP) y nafta (gasolina) por medio del rompimiento de moléculas de hidrocarburos grandes.

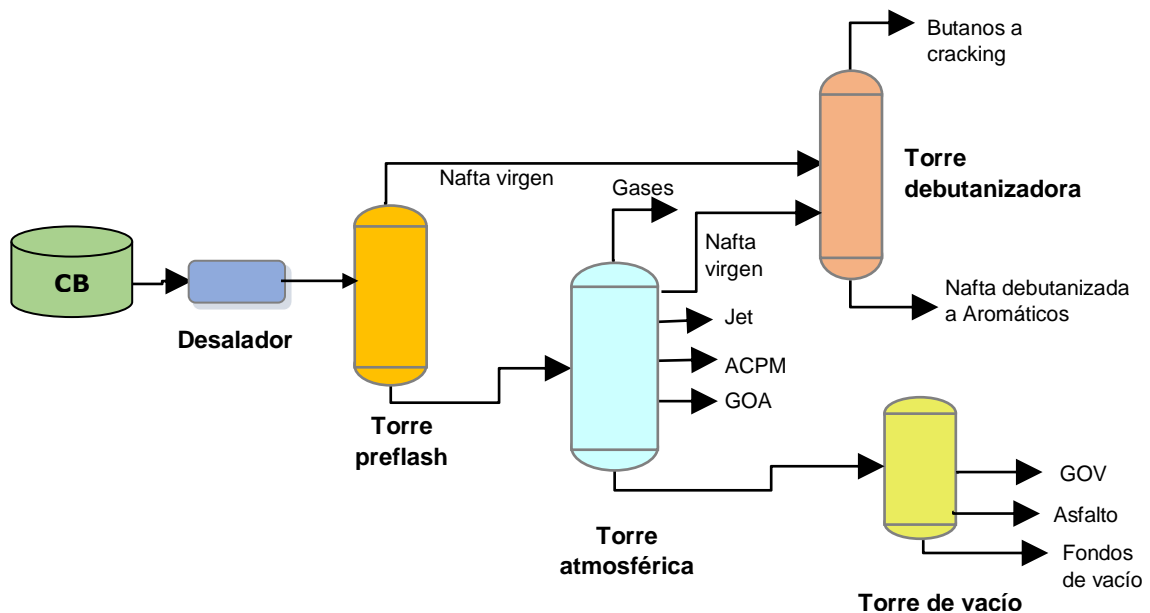
Uno de los productos obtenidos en la GRB de mayor valor comercial es el alquilato (isooctano), el cual se produce por medio de la reacción de alquilación, en la que reacciona isobutano y olefinas (butilenos) en presencia de ácido sulfúrico. El alquilato tiene alto octanaje y se utiliza como componente en el área de mezcla de gasolinas. El alquilato pesado es empleado para aumentar el octanaje de las gasolinas producto en la refinería (gasolina motor extra), y el alquilato liviano como componente principal del combustible de aviación conocido como AVIGAS [2]. Este es el principal producto obtenido en la nueva planta de alquilación (NPA), no obstante la planta tiene un bajo porcentaje de utilización debido a que no hay suficiente materia prima disponible para consumirse en la reacción de alquilación. El desarrollo de la presente práctica empresarial se enfoca en la búsqueda de estrategias para aumentar la carga de materia prima (isobutano) a la NPA y a su vez maximizar la producción de alquilato.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 FUNCIONAMIENTO DE LAS UNIDADES TOPPING

Estas son unidades de destilación que permiten obtener los diferentes cortes del crudo, están compuestas por dos secciones principales: una atmosférica y otra de vacío (Ver Figura 1) [3].

Figura 1. Diagrama de flujo de las unidades topping.



El crudo proveniente de los tanques de Casa Bombas (CB), llega a la unidad pasando por un primer tren de intercambio de calor, con el objetivo de darle la temperatura óptima antes de la entrada al desalador, donde el agua se sedimenta arrastrando gran parte de las sales que contiene el crudo y que son promotoras de la corrosión [4]. Posteriormente, pasa a una torre pre-flash donde se retira la nafta liviana y los gases que vienen con el crudo, luego pasa por un segundo tren de intercambio de calor, un horno e ingresa a la torre atmosférica en la zona flash. En la torre atmosférica se lleva a cabo el proceso de destilación y se obtiene la

nafta por el circuito de cima, la cual contiene los compuestos más livianos del crudo. Esta nafta es enviada a la torre debutanizadora con el fin de retirar los compuestos más livianos, formados por uno hasta seis carbonos (C₁-C₆) para ser enviados a la unidad de recuperación de vapores (VRU) de las unidades cracking [5]; la nafta debutanizada obtenida en la corriente de fondo se envía como carga a la planta de aromáticos.

Por otro lado, en la torre atmosférica se obtiene como medios jet A1 y ACPM, y simultáneamente, como corte pesado se extrae el gasóleo atmosférico y el crudo reducido, el cual se envía a la torre de vacío, para obtener otros productos como gasóleo liviano de vacío (GLV), gasóleo pesado de vacío (GPV) y asfalto como producto pesado [6].

En la refinería de Barrancabermeja existen cinco unidades de destilación: U-150, U-200, U-250, U-2000 y U-2100, no obstante, solo la unidad U-150, U-250 y U-2000 tienen sección debutanizadora. En la Tabla 1 se especifica el nombre y la función correspondiente para cada una de las torres existentes en las unidades topping, las cuales hacen parte del presente estudio.

Tabla 1. Torres unidades topping

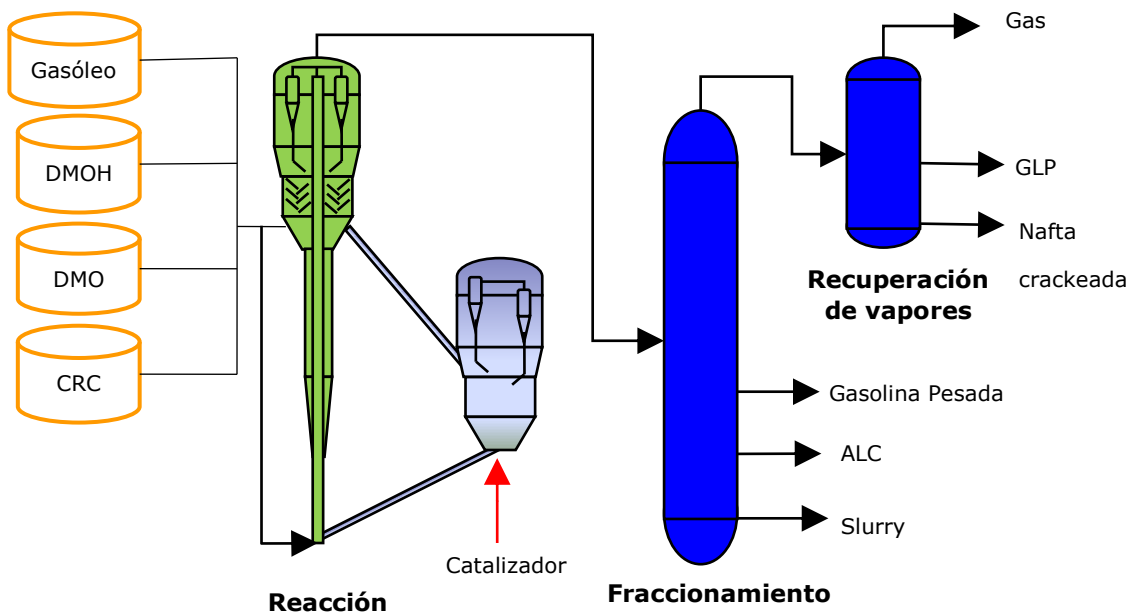
UNIDAD	Torre preflash	Torre atmosférica	Torre debutanizadora
U-150	T-152	T-150	T-171
U-200	T-201	T-204	---
U-250	---	T-250	T-252
U-2000	T-2005	T-2000	T-2005
U-2100	---	T-2101	---

1.2 FUNCIONAMIENTO DE LAS UNIDADES CRACKING

La planta de cracking es una unidad en la que se lleva a cabo el proceso de ruptura catalítica para la conversión de fracciones pesadas de hidrocarburos en productos más livianos y de mayor valor económico [7].

En la sección de carga la mezcla es calentada y homogenizada (ver figura 2). Esta carga precalentada fluye hacia el elevador del reactor a través de unas boquillas que tienen inyección de vapor de atomización para favorecer el contacto íntimo de ésta con el catalizador. Se circula continuamente el catalizador fluidizado desde la zona de reacción a la zona de regeneración donde se activa el catalizador. Los productos del cracking fluyen del reactor a la fraccionadora, la cual los separa en productos líquidos y gaseosos para un procesamiento posterior. Por el fondo de la fraccionadora se obtiene aceite slurry, como corrientes laterales se obtiene aceite liviano de ciclo (ALC) y gasolina pesada, y por la corriente de cima gasolina y gases, los cuales son comprimidos para ser enviados a la VRU, cuyo fin es separar los gases más livianos (C_1 , C_2 , C_3 , C_4), de los hidrocarburos más pesados (C_5 , C_6 y otros), a través de procesos de absorción, despojo, debutanización y depropanización [8].

Figura 2. Diagrama de flujo de las unidades cracking



En el proceso de depropanización se da la separación del propano (C_3) y butano (C_4). Por la corriente de fondo se obtiene el GLP (principalmente butano y

butileno), el cual tiene facilidad para ser enviado hacia la NPA o a almacenamiento a la nueva estación de GLP (NEGLP).

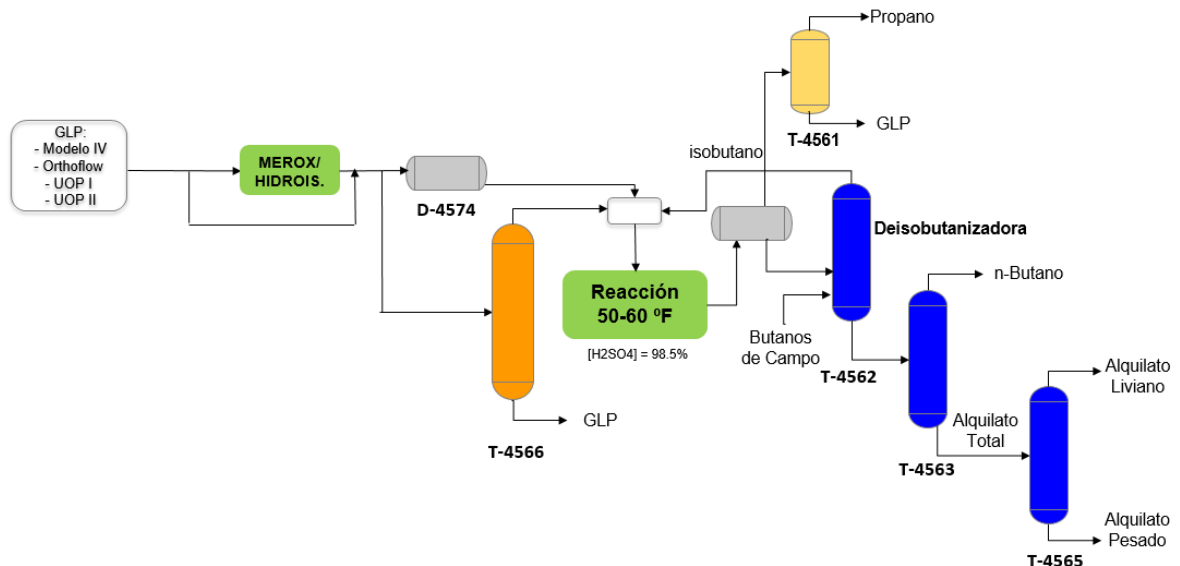
En la refinería de Barrancabermeja existen cuatro unidades de craqueo catalítico denominadas: Modelo IV, Orthoflow, UOP I y UOP II. En la Tabla 2 se especifica el nombre de las torres depropanizadoras correspondiente a cada una de las unidades de cracking, las cuales hacen parte del presente estudio.

Tabla 2. Torres depropanizadoras de cracking.

UNIDAD	Depropanizadora
Orthoflow	T-556
Modelo IV	T-304
UOP I	T-2755
UOP II	T-4255

1.3 FUNCIONAMIENTO DE LA NUEVA PLANTA DE ALQUILACIÓN (NPA)

Figura 3. Diagrama de flujo de la nueva planta de alquilación



En esta unidad se da el proceso de alquilación, en el cual se utilizan olefinas e isobutano para formar isooctano o alquilato, en una reacción que utiliza el ácido

sulfúrico (H_2SO_4) como catalizador. Las olefinas constituyen la fracción ligera de los productos obtenidos del craqueo catalítico, las cuales contienen en su estructura molecular, por lo menos un doble enlace entre átomos de carbono contiguos [9].

Inicialmente la carga de GLP pasa por la sección de Merox e Hidroisomerización. En Merox se eliminan los compuestos ácidos por contacto con soda y en Hidroisomerización el butadieno se convierte en olefinas adecuadas para la reacción de alquilación [10], es de destacar que actualmente estas dos plantas están fuera de servicio.

En el tambor de carga D-4574 ingresa la corriente procedente de Hidroisomerización, una parte de la corriente del hidrocarburo de salida de éste se envía hacia la torre separadora de isobutano-olefinas (T-4566) y la otra parte se envía directamente a la sección de reacción. En la torre T-4566 se separa por la cima la mayoría de isobutano con trazas de olefinas para ser enviado a la zona de reacción, con el fin de aumentar la relación isobutano/olefinas necesaria para que se dé la reacción de alquilación; por el fondo se obtiene el exceso de olefinas, el cual se envía a almacenamiento hacia la nueva estación de GLP,

En la sección de reacción el isobutano reacciona con olefinas para producir el alquilato, en presencia de H_2SO_4 . La relación volumétrica de isobutano/olefinas en la composición de la corriente de alimentación a la zona de reacción debe estar en el rango de 7:1 a 10:1, para asegurar que todas las olefinas presentes en la corriente reaccionen y evitar la polimerización de las olefinas en la zona de reacción [11]. El efluente procedente de la sección de reacción pasa por una serie de tratamientos para separar el ácido gastado y remover los sulfatos formados en la reacción. En la torre depropanizadora T-4561 se purgan los propanos que ingresan a las corrientes de carga a la unidad.

Finalmente la corriente procedente de los tratadores es enviada a la sección de fraccionamiento donde se separan los productos de la unidad. En la deisobutanizadora T-4562 se separa el isobutano del efluente neto para recircularlo al proceso. En la torre debutanizadora se separa el normal butano del alquilato, y en la torre fraccionadora de alquilato se separa el alquilato liviano y el alquilato pesado.

1.3.1 Problemática en el sistema de carga de la Unidad

La NPA está ubicada en el Departamento de Cracking II y fue puesta en servicio en el año 2002, manejando una carga combinada de GLP proveniente de las unidades cracking. Esta fue diseñada para producir 4500 BPD de alquilato total, haciendo uso de 3 reactores. En el diseño de la planta se establecieron como cargas el GLP producto de las 4 unidades cracking, fijando principalmente el parámetro de relación isobutano/olefinas para cada corriente, el cual debe ser cercano a 1 para aumentar el volumen de isobutano disponible a consumirse en la reacción de alquilación [12].

Actualmente la NPA carga alrededor de 3100 BPD de GLP y butano de campo, a partir de los cuales se obtiene una producción de 2000 BPD de alquilato total haciendo uso solo de 2 reactores y en condiciones de baja carga [13]. El bajo factor de utilización de la planta se debe a que las corrientes de carga de GLP producidos en las VRU de cada cracking no cumplen con los parámetros de calidad necesarios para ser enviados a NPA, principalmente la relación isobutano/olefinas requerida en el diseño, esto debido a la mala calidad del crudo, el cual es cada vez más pesado.

Por tal razón la NPA presenta inestabilidad en su operación, ya que no tiene asegurado un flujo de carga constante, por tanto el volumen de productos obtenidos es variable y no se puede asegurar una producción fija disponible al

mercado, de igual manera los equipos de proceso de NPA están siendo afectados en su integridad y desempeño ya que operan en condiciones variables.

Durante el desarrollo de la presente práctica se buscó maximizar la carga de isobutano a la NPA, planteando distintas alternativas que permita recuperar este valioso componente existente en algunas corrientes de proceso de diferentes plantas de la GRB.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio técnico-económico de alternativas para la maximización de carga de isobutano a la nueva planta de Alquilación de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar el estado actual de la NPA, del sistema del GLP producto de las unidades cracking, y del sistema de nafta virgen de las unidades topping.
2. Plantear alternativas para maximizar la carga de isobutano a la NPA.
3. Realizar las respectivas simulaciones para las alternativas planteadas e identificar el potencial de isobutano recuperable.
4. Realizar una evaluación técnico-económica de las alternativas.

3. METODOLOGÍA

A continuación se presenta la metodología empleada durante la práctica empresarial para llevar a cabo los objetivos mencionados anteriormente. Este trabajo se desarrolló en cuatro etapas metodológicas, las cuales se describen a continuación:

Figura 4. Esquema de la metodología empleada para el desarrollo de la práctica empresarial.



3.1 EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA NPA, SISTEMA DE GLP Y SISTEMA DE NAFTA VIRGEN.

Se realizó una revisión del estado del arte del proceso operativo actual que se lleva a cabo en la NPA, en las unidades cracking y en las unidades topping, mediante la lectura de manuales de descripción del proceso de cada unidad, inspección en visitas a planta con los operadores y exposición por parte de los técnicos de operaciones del COR (Centro de Optimización de la Refinería). Se

identificaron las corrientes de proceso que contienen un potencial de isobutano recuperable, el cual no está siendo aprovechando para la producción de alquilato.

3.2 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS.

Con base en el estudio realizado se plantearon cinco alternativas con diferentes escenarios, teniendo en cuenta que hay dos torres de destilación disponibles en las unidades Topping, las cuales serán utilizadas para recuperar el isobutano presente en las corrientes de proceso identificadas: torres debutanizadoras T-2004 y T-252. Estas se encuentran fuera de operación debido a que los crudos son cada vez más pesados y por lo tanto la cantidad de nafta que se despoja en cada unidad ya no es suficiente para poner las tres debutanizadoras en servicio. Actualmente solo opera la debutanizadora T-171, y la unidad de Aromáticos se alimenta con la nafta debutanizada procedente de ésta, por tal razón en el planteamiento de las alternativas se da prioridad de carga de nafta a la torre T-171.

Posteriormente se presentaron las alternativas propuestas al equipo de trabajo, quienes de acuerdo a sus conocimientos y experiencia en sus respectivas áreas participaron en la toma de decisiones para la continuación de la siguiente etapa.

3.3 SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS PLANTEADAS.

Con el objeto de conocer las alternativas que entregan mayor potencial de isobutano, se realizaron las respectivas simulaciones en el software PRO II 9.1, haciendo uso del paquete termodinámico Peng-Robinson, el cual es el recomendado para aplicaciones de gas y petroquímica (hidrocarburos livianos) [14]. Se consideró una eficiencia global de platos de las torres del 80%, evaluando las condiciones óptimas de operación en cuanto a presión de operación de la torre, relación de reflujo, y energía suministrada en el rehervidor. Se optimizaron

estas condiciones, buscando alcanzar la mayor recuperación de isobutano y el menor arrastre de compuestos pesados, hasta un punto tal que la inundación en los platos no superara el factor del 80%. Para ello fue necesario buscar información de condiciones de operación de los equipos, hojas de datos, PFD y P&ID (Piping and Instrumentation Diagram). De igual manera para definir las distintas corrientes en cuanto flujo, composiciones y variables de estado, se hizo uso de los portales electrónicos de la refinería como CDLAB, RIS, y análisis de muestras realizadas por el ICP (Instituto Colombiano del Petróleo). Los resultados fueron socializados con el equipo de trabajo.

3.4 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE ALTERNATIVAS.

3.4.1 Evaluación técnica

Para evaluar las alternativas se tuvo como criterio, la facilidad de implementación de cada una. Por lo que se realizó un seguimiento en campo para identificar la disponibilidad de líneas existentes y las nuevas líneas a construir, para su posterior diseño. Se hizo un análisis hidráulico y una revisión de la operación normal de los equipos como torres de destilación, intercambiadores de calor y bombas, y finalmente se tuvo en cuenta las modificaciones necesarias a realizar para llevar a cabo la correcta implementación de cada alternativa bajo las nuevas condiciones de operación, de manera segura.

El análisis hidráulico para las facilidades nuevas y existentes se simuló empleando el software especializado INPLANT 4.2, que permite mediante la simulación de flujo de fluidos en estado estable, conocer las características hidráulicas de un sistema de tuberías y los valores de contrapresión producidos por la cabeza estática del fluido y pérdidas por fricción en los sistemas evaluados [15]. La simulación se realizó bajo la consideración de flujo máximo y flujo en fase líquido dentro de la tubería, con objeto de obtener datos de la caída máxima de presión a lo largo de la tubería.

3.4.2 Evaluación económica

Se realizó un análisis de costos preliminar, mediante el cálculo del factor J. El factor de riesgo (factor J) es el principal parámetro en la evaluación de rentabilidad y factibilidad económica de un proyecto en la etapa de Ingeniería Conceptual en la GRB. Este se calcula a partir de la ecuación (1), el cual debe ser mayor que 1 para indicar que el proyecto es factible, entre mayor sea el valor del factor J, mayor será la viabilidad económica [16].

Se calculó el factor J para las alternativas en estudio, con el fin de determinar los beneficios económicos que ofrece cada una. Para ello se hallaron las ganancias anuales generadas al implementar el proyecto (R) y los costos de inversión C_i . Se consideró como ganancias la venta del aquilato producido a partir del isobutano recuperado, y la venta de los otros productos. Para calcular los costos de inversión se empleó el software Aspen In Plant Cost Estimator (ICARUS) utilizado en Ecopetrol, este software genera costos de capital (CAPEX) y costos de mano de obra [17]. Los costos de capital incluyen costos directos (costos de tubería, instrumentación, eléctricos, instalación, construcción y costos de ingeniería) y costos indirectos, los cuales se asumen como el 40% del total de costos directos. Dentro de los costos de operación (OPEX) se incluyó costos de mano de obra, y costos de servicios industriales, los costos de materia prima no se incluyen ya que esta se obtiene de las mismas corrientes de proceso de diferentes plantas de la refinería, no obstante si se tiene en cuenta el precio de venta de los productos que se venden actualmente a partir de estas corrientes de proceso, las cuales serán destinadas para la producción de aquilato.

$$\text{Factor } J = \left(\frac{R1-R2}{C_i} \right) \quad \text{Ecuación (1)}$$

R1= Dinero ganado al implementar el proyecto (Valor de riesgo después)

R2= Dinero ganado al no implementar el proyecto (Valor de riesgo antes)

C_i = Costo de la inversión.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

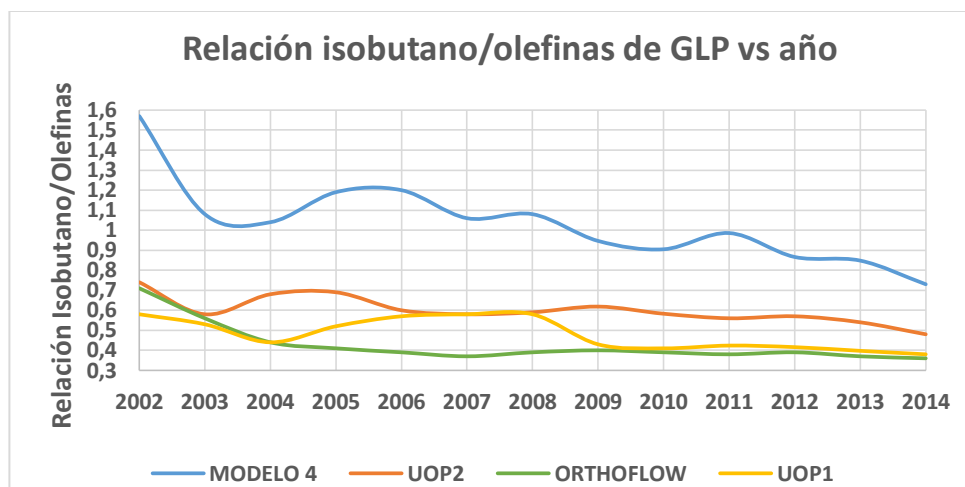
4.1 EVALUACIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LA NPA Y SISTEMA DE GLP Y NAFTA VIRGEN.

Figura 5. Corrientes de entrada y salida de la NPA.



Actualmente la NPA recibe carga únicamente de cracking Modelo IV y UOP II, y butanos de campo. La relación isobutano/olefinas del GLP de cracking ha disminuido notoriamente desde el año de puesta en servicio de la NPA, como se puede evidenciar en la figura 6.

Figura 6. Variación de relación isobutano/olefinas de GLP de cracking (2002-2014)



Esto se debe al cambio en la calidad de las cargas a cracking, pues éstas son cada vez más pesadas y por lo tanto se requieren esquemas de procesamiento más severos, lo que hace que la composición de GLP aumente principalmente en contenido de olefinas [18]. Por esta razón las corrientes de GLP de cracking UOPI y Orthoflow ya no son cargadas a la NPA porque han disminuido considerablemente su relación isobutano/olefinas en comparación con las que se disponían cuando la NPA inició su operación. La corriente de GLP de cracking UOP II no es cargada en su totalidad a NPA debido a que no contiene el suficiente isobutano para llevar a cabo la reacción con las olefinas que esta corriente contiene. Esta fracción de GLP de UOP II que no es cargada a NPA, al igual que la corriente de GLP de UOPI y Orthoflow, son enviadas a la nueva estación de GLP.

En la Tabla 3 se muestra la producción de GLP promedio para el año 2014 de cada cracking, y la cantidad enviada a NPA o a NEGLP, respectivamente, donde se puede observar que aproximadamente 6700 BPD de GLP que según diseño deberían ser cargadas a la NPA para producir alquilato, están siendo enviados a la NEGLP para ventas a un precio 3.5 veces menor.

Tabla 3. Producción de GLP de cracking

UNIDAD	A NPA	A N EGLP
ORTHOFLOW	---	1800
MODELO IV	2200	---
UOP I	---	2400
UOP II	2000	2500

Cabe resaltar también, que actualmente la torre T-4566, torre separadora de isobutano/olefinas de NPA, se encuentra limitada a una carga máxima aproximada de 4200 BPD de GLP, debido a que el sistema de tubería y bombeo de fondo de la torre no tiene capacidad para manejar un flujo mayor, pues desde hace dos años se implementó otro proyecto que hace uso de este mismo sistema.

- Sistema de Nafta Virgen

La nafta obtenida en la etapa inicial de destilación del crudo, se clasifica en nafta liviana y nafta pesada. La nafta liviana (con punto inicial de ebullición entre 80°F y 94°F) es enviada a la debutanizadora T-171 y se obtiene de las torres pre-flash T-152 y T-2005, y también la torre T-201. La nafta pesada (con punto inicial de ebullición entre 96°F y 155°F) se obtiene como producto de las torres T-150, T-250, T-204, T-2101 y T-2000, la cual se envía a la planta de tratamiento con soda para remover compuestos sulfurados y luego ser enviada a la zona de mezcla de gasolinas, para obtener la gasolina como producto final [19].

4.2 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

Dentro de las alternativas planteadas se consideró la posibilidad de aprovechar el GLP de cracking que está siendo enviado hacia la NEGLP y la nafta que se envía a planta de tratamiento con soda, para recuperar el isobutano presente en estas corrientes. La nafta debutanizada será enviada directamente a la zona de mezcla de gasolinas garantizando que cumple con el parámetro de corrosión 1A, de esta manera se ahorran costos generados por el consumo de soda, costos operacionales de la planta de tratamiento, y se genera un impacto ambiental positivo al disminuir los altos inventarios de soda gastada que tiene gran contenidos de sulfuros.

Con base en la información descrita anteriormente, se proponen las siguientes alternativas. En el Anexo B se muestran los esquemas de proceso para cada alternativa planteada.

Alternativa 1: Recuperación de isobutano de nafta virgen enviada a tratamiento, en la torre debutanizadora T-2004: la alternativa propone recuperar el isobutano presente en todas las corrientes de nafta que actualmente se envían

a tratamiento con soda, destilando los compuestos más livianos en la torre T-2004 para enviarlos directamente a la deisobutanizadora de NPA, T-4562. Con la implementación de esta alternativa la planta de tratamiento de nafta virgen con soda permanecerá fuera de servicio.

Alternativa 2: Recuperación de isobutano de nafta virgen en las debutanizadoras torre T-171 y torre T-2004 en serie con la torre T-252: toda la nafta virgen (liviana y pesada) será debutanizada en las torres T-171 y T-2004, las corrientes de cima de cada una serán alimentadas a la torre T-252 para retirar compuestos pesados restantes y enviar la corriente liviana a la VRU de Modelo IV, con el fin de retirar contenido de propano presente en la corriente para luego enviarla hacia la NPA. Con la implementación de esta alternativa la planta de tratamiento de nafta virgen con soda permanecerá fuera de servicio.

Alternativa 3: Recuperación de isobutano de nafta virgen en las debutanizadoras torre T-171 y torre T-2004 en serie con la torre T-252, enviando corriente liviana directamente a NPA: a diferencia de la Alternativa 3, la corriente de cima de la torre T-252 no será enviada a la VRU de Modelo IV, sino directamente a la torre T-4562 de NPA, donde se destila el isobutano y se recircula a la zona de reacción.

Alternativa 4: Envío de GLP de cracking directamente hacia la deisobutanizadora de NPA T-4562: se plantea enviar las corrientes producto de GLP de las unidades cracking directamente a la torre desisobutanizadora T-4562 para recuperar el isobutano y recircularlo a la zona de reacción.

Alternativa 5: Uso de la torre T-2004 como separadora de isobutano/olefinas de GLP de Cracking: el GLP de cracking que está siendo enviado a la NEGLP será alimentado en la T-2004, la cual tendrá la misma función que la torre T-4566

de NPA: separar el isobutano de las olefinas exceso, ya que como se explicó anteriormente la torre T-4566 está limitada en su carga.

Las alternativas anteriores fueron socializadas con el equipo de trabajo, donde mediante un consenso se tomaron las siguientes decisiones:

La alternativa 2 no es conveniente debido a que la corriente procedente de la torre T-252, se mezclaría en el tambor D-305 con las gasolinas craqueadas provenientes de fraccionamiento, mezclándose nuevamente con compuestos pesados y perdiendo parte del contenido de isobutano en las gasolinas producto.

La Alternativa 4 se descarta debido al alto contenido de olefinas presentes en la corriente de GLP de cracking, lo cual en la torre T-4562 afectaría la calidad del alquilato producto.

4.3 SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS

Las alternativas fueron simuladas partiendo de información de cada una de las corrientes de proceso involucradas y hojas de datos de los equipos.

Corriente de nafta virgen: la nafta virgen tiene gran número de componentes, clasificados en diferentes grupos: parafinas, isoparafinas, aromáticos, naftenos y olefinas [20]. Para simular estas corrientes se partió de las curvas destilación para cada una, tomando un promedio desde el 1 de Enero hasta el 30 de Septiembre del 2014 (ver Anexo C). También se ingresaron las composiciones de los componentes livianos de las naftas, para así conocer la cantidad de isobutano presente en cada corriente. En el Anexo D se presenta un promedio de 4 muestras de componentes livianos de las naftas tomadas por el ICP.

Corriente de cima de torre T-171: se solicitó a laboratorio tomar una cromatografía a la corriente de cima de la torre T-171. (Ver anexo E).

Corriente de GLP: Se tomó un promedio de los datos de muestras de GLP de cracking, desde el 1 de Enero hasta el 30 de Septiembre del 2014 (Ver Anexo F).

Alternativa 1. Para una alimentación total de 16.100 BPD de nafta virgen a la torre T-2004, se obtienen los siguientes resultados en la corriente de cima:

Tabla 4. Resultados simulación Alternativa 1, PRO II 9.1

	ALIMENTO T-2004 (% VOL)	CIMA T-2004 (% VOL)
FLUJO [BPD]	16.100	2.000
Etano	0,109	1,53
Propano	0,67	10,55
Isobutano	0,88	13,9
N-butano	2,11	29,53
N-pentano	5,4	14,16
Ciclopentano	0,51	0,8
Isopentano	5,2	18,47
Más pesados	85,12	11,06

Alternativa 3. Para una alimentación total de butanos líquidos de 6.000 BPD a la torre T-252 (4.000 BPD de la torre T-171 y 2.000 BPD de T-2004):

Tabla 5. Resultados simulación Alternativa 3, PRO II 9.1

	ALIMENTO T-252 (% VOL)	CIMA T-252 (% VOL)
FLUJO [BPD]	6.000	2.000
Etano	0,78	1,22
Propano	6,38	16,25
Isobutano	8,76	22
N-butano	21,96	43,9
Cis-2-buteno	1,18	2,25
Ciclopentano	19,9	0,53
Isopentano	26,87	12,24
Más pesados	14,17	1,61

Alternativa 5. Para una alimentación de 6.200 BPD de GLP en la T-2004

Tabla 6. Resultados simulación Alternativa 5, PRO II 9.1

	ALIMENTO T-2004 (%VOL)	CIMA T-2004 (% VOL)
FLUJO BPD	6.200	1.900
Propano	2,2	6,61
Propileno	0,78	2,12
Isobutano	24,05	41,88
N-butano	15,71	5,64
T-2buteno	12,12	3,52
1,3 butadieno	0,97	0,82
1-buteno	13,55	13,09
Isobutileno	22,78	25,22
C-2-buteno	7,68	1,06
Total olefinas	58	45,83
Pesados	0,04	0
Relación isobutano/olefinas	0.41	0.91

Nuevamente, los resultados de las simulaciones fueron socializados con el equipo de trabajo, donde mediante un consenso se tomaron las siguientes decisiones:

La Alternativa 1 no es viable debido al alto contenido de componentes pesados en la corriente de cima de la torre T-2004 (alrededor del 45%), lo que afecta la calidad del alquilato producto en la deisobutanizadora T-4562.

Las alternativas 3 y 5 entregan un potencial de isobutano valioso, por lo que se procede a hacer una evaluación técnico-económica para así seleccionar la alternativa que genera mayor beneficio económico a la GRB.

4.4 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA

4.4.1 Evaluación técnica

Análisis hidráulico en tuberías:

Inicialmente se definió la secuencia de operación, ruteos y alineamientos necesarios para la correcta operación de cada una de las dos alternativas, se diseñaron las nuevas líneas a construir cumpliendo con los parámetros establecidos en el manual técnico de criterios de diseño de la Especialidad de Ingeniería de proceso de Ecopetrol S.A, en lo que refiere a condiciones de flujo, presión y temperatura.

Los resultados de la simulación hidráulica se muestran en el Anexo G, de la cual se puede concluir que: para la alternativa 5, aun teniendo en cuenta los valores máximos de flujo volumétrico que se van a manejar en cada línea y en consecuencia las máximas caídas de presión en la tubería, se dispone de suficiente presión a la salida de cada una de las torres depropanizadoras de UOP1, UOP2 y Orthoflow para que el GLP llegue con la presión requerida a la torre T-2004.

Para la Alternativa 3 no se presenta dificultad en el envío de nafta virgen a la torre T-2004, ya que todo el sistema hidráulico fue diseñado para ello.

Análisis hidráulico en bombas

Torre T-252: La bomba de la corriente de fondo, P-251 B, tiene una capacidad de caudal mayor al caudal disponible a tratar según la simulación (4000 BPD), por lo que es necesario instalar una línea de recirculación desde la tubería de descarga hasta la tubería de succión de la bomba, con el fin de asegurar el flujo mínimo recomendado de ésta, el cual para un diámetro de impulsor de 9,437 pulgadas es de 367 gpm (12.580 BPD).

Por otra parte la bomba de la corriente de cima de la torre (P-281 A/B) tiene una capacidad de caudal inferior (3085 BPD) al caudal que debe tratar según la simulación (4400), por lo que se analizó la posibilidad de aumentar el diámetro del impulsor de la bomba al máximo permitido, el cual se encontró en la hoja de datos

del equipo que es de 5,812 in, por lo que a partir de las leyes de afinidad se calcula el nuevo caudal que esta bomba puede tratar. Las leyes de afinidad muestran la forma en la que varía el caudal, la cabeza y la potencia cuando el diámetro del impulsor varía. La eficiencia permanece casi constante para pequeñas variaciones del diámetro del impulsor [21].

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1}$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$$

$$\frac{BHP_2}{BHP_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^3$$

Dónde:

- ✓ Q: Caudal
- ✓ H: Cabeza entregada por la bomba
- ✓ D: Diámetro del impulsor
- ✓ BHP: Potencia de la bomba

Al trazar la nueva curva de cabeza vs caudal para el diámetro de 5,812 in, se pudo observar que a una eficiencia muy baja (de 34% aproximadamente) es posible alcanzar un caudal de 97 gpm (3325 BPD), pero aun así no cumple con la condición de caudal requerida.

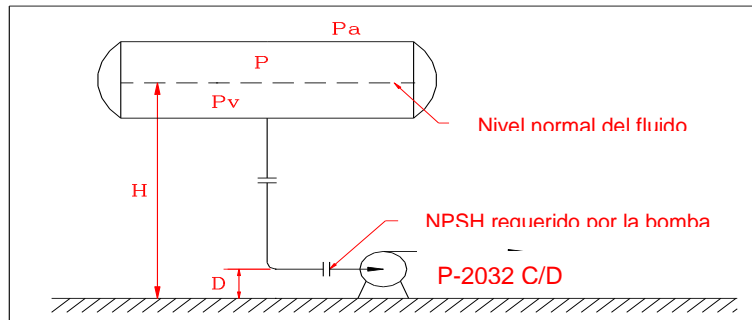
Torre T-2004: Para la implementación de la Alternativa 3, las bombas de las corrientes de alimentación, cima y fondo de la torre T-2004 no presentan ningún problema pues estas fueron diseñadas para manejar caudales de nafta virgen. No obstante con la implementación de la Alternativa 5, se realizó un estudio de las nuevas condiciones de rendimiento de cada bomba (cima y fondo) con el manejo de GLP de cracking, puesto que la presión de vapor y la gravedad específica del fluido varían. La bomba de la corriente de fondos de la torre T-2004 (P-2012 C/D), fue diseñada para el manejo de un caudal mayor al caudal disponible a tratar (alrededor de 4.290 BPD), aunque este valor está ligeramente por encima del valor de flujo mínimo recomendado (3.976 BPD), la bomba trabajaría con una

eficiencia muy baja (25% aproximadamente), generando un aumento de las fuerzas hidráulicas dentro de ésta, afectando el rotor y produciendo altas vibraciones que afectan la integridad del equipo [22].

Mediante la ecuación (2) se calculó el NPSH (cabeza neta de succión positiva) disponible para las corriente de cima y fondo, para asegurar que este sea mayor al NPSH requerido por la bomba, ya que debe haber un margen de seguridad¹, tal que permita su adecuado arranque (venciendo la carga de aceleración del fluido), soporte el aumento de las pérdidas por fricción debidas al deterioro de la tubería y las posibles fluctuaciones en la altura estática del fluido (nivel) [23]. En el anexo H se especifica la definición de cada término de la ecuación, y el cálculo realizado para hallar el NPSH disponible.

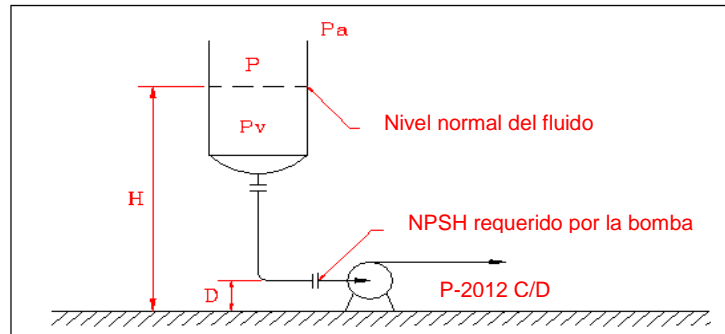
$$NPSHd = (P + Pa - Pv) * \frac{2,31}{SG} + (H - D - Pf) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Figura 7. Cálculo del NPSH disponible, corriente de cima de torreT-2004 (P-2032 C/D)



¹ Este margen debe ser mínimo de 3 ft para la mayoría de hidrocarburos y mínimo de 5 ft para sistemas de alimentación de agua de calderas y fluidos pesados.

Figura 8. Cálculo del NPSH disponible, corriente de fondo de torre T-2004 (P-2012 C/D):



Se hallaron las nuevas condiciones de rendimiento de cada bomba con el manejo de GLP de cracking, las cuales fueron tomadas de las gráficas de las curvas características de cada equipo.

Tabla 7. Condiciones de rendimiento de bombas P-2032 C/D y P-2012 C/D

	Flujo continuo	Cabeza entregada	Presión descarga	Eficiencia	Potencia	NPSH requerido	NPSH disponible
Alternativa 3	244,9 GPM	1.040 ft	1.360 ft	52%	35.100 ft*lb/seg	10 ft	19,7 ft
	8.397 BPD	243 psig	318 psig	52%	65 HP	2,33 psig	4,6 psig
Alternativa 5	300 GPM	275 ft	338 ft	57%	13.500 ft*lb/seg	8 ft	144 ft
	10.290 BPD	64 psig	143 psig	57%	25 HP	1,87 psig	33,68 psig

De la evaluación realizada anteriormente para las bombas de las corrientes de cima y fondo de la torre T-2004, es posible concluir que:

- El NPSH disponible es mayor que el NPSH requerido por la bomba.
- La presión de la corriente de descarga de cada bomba es mayor a la que se requiere para bombear el fluido a cada uno de sus destinos finales.
- La potencia del motor no supera el valor de potencia para el flujo de operación.
- Se debe instalar línea de recirculación desde la tubería de descarga hasta la succión de la bomba P-2012 C/D, a través de la cual se recircularán 6.000 BPD.

Con base en el estudio técnico se identificaron los siguientes alcances para cada alternativa:

Tabla 8. Requisitos para implementación de alternativas 3 y 5

ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 5
Instalar aprox. 160 metros de tubería de 3" de diámetro, schedule 40, y 10 válvulas (de compuerta, cheque y válvula con ciego)	Instalar aprox. 240 metros de tubería de 3" de diámetro, schedule 40, y 16 válvulas (de compuerta, cheque y válvula con ciego).
Instalar línea de recirculación de 3" a la bomba de corriente de fondo de la torre T-252, bomba P-251 B, con su respectivo medidor de flujo.	Instalar línea de recirculación de 3" a la bomba de corriente de fondo de la torre T-2004, P-2012 C/D, con su respectivo medidor de flujo.
Instalar Sistema de Control de presión de gases de rango dividido en el tambor de cima, D-252, con sus respectivos cuadros de control, ya que actualmente la presión del tambor se controla manualmente, pero debido al manejo de compuestos livianos, por seguridad se hace obligatorio la instalación de este.	Instalar una válvula de control de flujo con su respectivo cuadro de control de 3" en la NPA, para que regule el flujo de GLP de UOP II, enviado directamente a reacción y a la torre T-2004.
Realizar cambio de bomba de cima de torre T-252, P-281 A/B, por una bomba de mayor capacidad.	Construir una línea de bypass al intercambiador de calor de la corriente de fondo de T-2004, E-2014 C/D, pues la corriente no requiere enfriamiento.
Realizar cambio de ubicación de la válvula de control de nivel de la torre T-252, LIC2508, la cual actualmente está ubicada aguas arriba de la bomba P-251B, lo que no es correcto porque le quita NPSH disponible a la bomba haciendo que ésta presente cavitación y alta vibración [24].	
Cambiar la corriente de precalentamiento del rehervidor E-2020 de la torre T-2004, ya que la corriente actual (Gasóleo pesado de la T-2003) no entrega la energía requerida ($15,1 \cdot 10^6$ BTU/h) para despojar los componentes livianos de la nafta. En el anexo I se muestra la simulación de este y la cantidad de energía que puede entregar con la corriente actual.	
Evaluar manejo de alto volumen de propano contenido en la corriente de cima de la torre T-252, el cual puede presionar todo el sistema de la NPA, debido a que la depropanizadora T-4561 no tiene la capacidad para el manejo de este volumen.	

4.4.2 Evaluación económica

En el anexo L se especifican los precios de venta de los productos con los cuales se calculó el valor de *R1* y *R2* para cada alternativa², correspondientes al mes de febrero de 2015.

Como ingreso principal se tuvo en cuenta la venta del alquilato producido a partir del isobutano recuperado para cada alternativa, a precio de gasolina motor extra. La cantidad producida se calculó mediante la siguiente relación estequiométrica: por cada barril de olefinas se consume 1,12 barriles de isobutano para producir 1,78 barriles de alquilato [25].



Tabla 9. Producción de alquilato con las alternativas 3 y 5

	ISOBUTANO RECUPERADO [BPD]	ALQUILATO PRODUCIDO [BPD]
ALTERNATIVA 3	440	700
ALTERNATIVA 5	795	1.264

Para la alternativa 3, se incluyó dentro de los ingresos la venta del producto de la corriente de fondo de la T-252, la cual se envía a la zona de mezcla de gasolinas, y posteriormente a ventas, por lo que el ingreso se calculó a precio de gasolina motor regular. La corriente de cima de la torre T-252, contiene otros componentes como etano, propano, n-butano y otros, los cuales finalizan en la corriente de GLP y de alquilato, por lo cual se halla el ingreso por venta de estos, a precio de GLP y gasolina motor extra respectivamente. En el Anexo J se especifica la cantidad obtenida de estos otros productos y los respectivos ingresos anuales.

Para la alternativa 5 se incluyó dentro de los ingresos la venta de la corriente de fondo de la torre T-2004, la cual será enviada hacia la NEGLP a ventas a precio

² Los precios de estos productos fueron facilitados por la coordinación de Economía, Departamento de Programación de la Producción de Ecopetrol S.A, Barrancabermeja.

de GLP producto. La corriente de cima de la torre T-2004 contiene también propano, n-butano y olefinas, se halla el ingreso por venta de estos componentes a precio de GLP. Ver Anexo M.

En la tabla 12 se presentan los valores de $R1$, $R2$, C_i y factor J calculados para las alternativas 3 y 5.

Tabla 10. Resultados del análisis económico realizado para las alternativas 3 y 5

	$R1$: Ganancia generada al implementar el proyecto [USD\$/año]	$R2$: Ganancia generada al no implementar el proyecto [USD\$/año]	C_i : Costos de inversión [USD\$]	Factor J $\left(\frac{R1 - R2}{C_i}\right)$
Alternativa 3	102'049.344	101'397.000	375.489	1,7
Alternativa 5	65'945.500	44'128.500	200.089	109

Para la alternativa 3 el valor de $R1$ se halló con el total de ingresos anuales por venta de alquilato producido y demás productos (cima y fondo de T-252). El valor de $R2$ corresponde al ingreso actual que se obtiene por venta de la nafta, a precio de gasolina motor regular (corriente de alimentación a la torre T-252). Ver Anexo M.

Para la alternativa 5 el valor de $R1$ se halló con el total de ingresos anuales por venta de alquilato producido y demás productos (cima y fondo de T-2004). El valor de $R2$ corresponde al ingreso actual que se obtiene por venta del GLP de cracking que no está siendo enviado a la NPA (corriente de alimentación a la torre T-2004). Ver Anexo M.

A partir de la evaluación técnica y económica realizada, es posible concluir que se obtiene mayor beneficio económico al implementar la Alternativa 5, puesto que genera mayores ganancias con menor inversión y mayor facilidad de implementación, por lo que se selecciona para el posterior desarrollo de ingeniería conceptual, básica y de detalle.

5. CONCLUSIONES

- Las corrientes de GLP de cracking determinadas en el diseño para ser cargadas a la nueva planta de Alquiler, han disminuido considerablemente su relación isobutano/olefinas, razón por la cual ya no pueden ser enviadas en su totalidad a NPA, estas están siendo enviadas a la nueva estación de GLP para ventas a un valor de 19,5USD\$/Bbl (Febrero 2015), mientras que el alquiler es un producto de mayor valor comercial, 70,5USD\$/Bbl (Febrero 2015).
- Las simulaciones de las alternativas planteadas muestran que las corrientes de GLP de Cracking enviadas a la estación de GLP así como las corrientes de butanos de las naftas poseen un potencial de isobutano valioso.
- Mediante la evaluación técnica fue posible conocer las modificaciones necesarias a realizar para llevar a cabo la implementación de cada una de las alternativas en estudio de manera correcta y segura, de lo que se puede concluir que la Alternativa 5 tiene mayor facilidad de implementación.
- El análisis de factibilidad económica realizado mediante el cálculo del factor J para cada alternativa, muestra que se obtiene un factor muy superior para la alternativa 5 (J=109) en comparación con el obtenido para la alternativa 3 (J=1,7), lo que indica que la alternativa 5 genera mayor beneficio económico con menor inversión.
- Con la implementación de la alternativa 5 el GLP de cracking incrementa su relación isobutano/olefinas de 0,41 a 0,91, aumentando la carga de isobutano en aproximadamente 795 BPD, con lo que se incrementa a la vez la producción

de alquiler en 1.260 BPD, alcanzando una mayor porcentaje de utilización de la NPA con la puesta en servicio del tercer reactor.

6. RECOMENDACIONES

- Garantizar la operación de la cascada de nivel del fondo de las torres depropanizadoras de las cracking, T-2755, T-4255 y T-556 con el flujo de salida de GLP de tal forma que el selector de flujo dé prioridad al control de nivel de las torres, pues actualmente el control de cascada se hace con el lazo de flujo hacia la estación de GLP, no obstante el GLP será enviado únicamente hacia la T2004.
- Realizar verificación de la integridad mecánica de los drenajes y venteos de líneas de GLP que llegan de Cracking a la NPA.
- Verificar la integridad mecánica del condensador de cima de la torre T-2004 (E-2020) antes de la puesta en servicio con la nueva operación de GLP.
- Realizar una prueba hidrostática a los intercambiadores de calor para garantizar que los tubos no tengan fuga.
- Se recomienda aplicar el plan API 52 o 53 para la bomba de fondo P2012C/D para la operación con GLP [26].
- Establecer un plan de calidad para muestreo diario de la corriente de GLP de fondo de la torre T-2004 y tener en cuenta un escenario para el cual ésta corriente no cumpla con las especificaciones requeridas para ser enviada al pool de GLP por presencia de componentes pesados.
- Evaluar el impacto que tendría el paso de gasóleo pesado de la T-2003 (corriente de precalentamiento del rehervidor E-2020) a la corriente de GLP durante la operación normal del rehervidor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ecopetrol S.A. Manual de inducción: Departamento de Refinación de Crudos CA03_rev02. Barrancabermeja, Colombia. 2012. 57p.
- [2] Ecopetrol S.A. Manual de Descripción de Procesos de la Unidad de Alquilación 2009. Rev0. Barrancabermeja, Colombia. Noviembre, 2009. 53p.
- [3] Ecopetrol S.A. Manual de inducción: Departamento de Refinación de Crudos. Barrancabermeja, Colombia. 2012. 57p.
- [4] Ecopetrol S.A. Manual de descripción de procesos de la Unidad Crudo U-250. Barrancabermeja, Colombia. 2013. 399p.
- [5] Ecopetrol S.A. Manual de descripción de procesos de la Unidad Crudo U-2000. Barrancabermeja, Colombia. 2013. 447p.
- [6] Ecopetrol S.A. Manual de descripción de procesos de la Unidad U-250. Barrancabermeja, Colombia. 2013. 2 p.
- [7] Ecopetrol S.A. Manual de descripción de procesos de la Unidad de Cracking UOP 2. Rev 0. Barrancabermeja, Colombia. 2007. 47 p.
- [8] Ecopetrol S.A. Manual de descripción de procesos de la Unidad de Cracking UOP 2. Rev 0. Barrancabermeja, Colombia. 2007. 102-109 p.
- [9] AMADOR, Jorge. CHAVARRO, Karen. Revisión de Heurísticas y conceptos para el diseño de equipos utilizados en procesos de refinación del petróleo. Universidad de San Buenaventura. 2012 17 p.
- [10] Ecopetrol S.A. Manual de Descripción de Procesos de la Unidad de Alquilación 2009. Rev0. Barrancabermeja, Colombia. Noviembre, 2009. 71p.
- [11] Ecopetrol S.A. Manual de Descripción de Procesos de la Unidad de Alquilación 2009. Rev0. Barrancabermeja, Colombia. Noviembre, 2009. 33p.
- [12] Ecopetrol S.A. Manual de Descripción de Procesos de la Unidad de Alquilación 2009. Rev0. Barrancabermeja. Noviembre, 2009. 180 p.
- [13] Ecopetrol S.A. Reporte de balance mensual. Diciembre, 2014. Libro Excel.

- [14] Aspen Technology. Inc. Properties and Methods Technical Reference. Burlington, USA. Noviembre, 2013. 76 p.
- [15] INVENSYS. Inplant. [En línea]
http://iom.invensys.com/LA/pages/SimSci_ProcessEngSuite_INPLANT.aspx
[Citado el 17 de junio de 2015]
- [16] Ecopetrol S.A. Análisis de factibilidad para control de cambios de planta. Versión 1. Barrancabermeja, Colombia. 2010.
- [17] ASPENTECH. Icarus. [En línea].
<http://www.aspentech.com/products/aspen-icarus-project-manager.aspx>
[citado el 15 de Junio de 2015]
- [18] Ecopetrol S.A. Manual de descripción de procesos de la Unidad de Cracking UOP 2. Rev 0. Barrancabermeja, Colombia. 2007. 137 p.
- [19] Ecopetrol S.A. Manual de descripción de procesos de la Unidad de Tratamientos con soda CA03_rev0. Barrancabermeja, Colombia. 2007. 23 p.
- [20] BUENO, Alexis. Caracterización de corrientes de la planta de aromáticos de la GCB mediante espectroscopía NIR. Bucaramanga. 2008. 4 p.
- [21] MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos aplicada. Cuarta Edición. México.1996. 400 p.
- [22] CAMPOS, Juan Carlos. Ahorro de energía en sistemas de bombas centrífugas. Universidad del Atlántico, Barranquilla. 2002. 24 p.
- [23] LIEBERMAN, Norman. DOFOUR, John. NELSON, William. Centrifugal Pump Source Book. McGraw-Hill, Inc. USA. 1993.
- [24] Ecopetrol S.A. Manual técnico de criterios de diseño de la especialidad de Ingeniería de proceso. Versión 1. Barrancabermeja, Colombia. 2010. 31 p.
- [25] J.H. Gary, G.E.Handwerk. Petroleum Refining. Technology and Economics. Editorial Reverté, S.A. New York, USA. Junio, 2003.
- [26] ANSY/API STANDARD 682. Pumps-Shaft Sealing Systems for Centrifugal and Rotatory Pumps. Tercera edición. Septiembre, 2004.
- [27] Ecopetrol S.A. Guía de especificaciones para Ingeniería Conceptual. Rev 1. Barrancabermeja. Febrero, 2012. 4 p.

BIBLIOGRAFÍA

AMADOR, Jorge. CHAVARRO, Karen. Revisión de Heurísticas y conceptos para el diseño de equipos utilizados en procesos de refinación del petróleo. Universidad de San Buenaventura. 2012.

ANSY/API STANDARD 682. Pumps-Shaft Sealing Systems for Centrifugal and Rotatory Pumps. Tercera edición. Septiembre, 2004.

Aspen Technology. Inc. Properties and Methods Technical Reference. Burlington, USA. Noviembre, 2013.

Ecopetrol S.A. Guía de especificaciones para Ingeniería Conceptual. Rev 1. Barrancabermeja. Febrero, 2012.

Ecopetrol S.A. Manual de descripción de procesos de la Unidad Crudo U-250. Barrancabermeja, Colombia. 2013.

Ecopetrol S.A. Manual de descripción de procesos de la Unidad de Cracking UOP 2. Rev 0. Barrancabermeja, Colombia. 2007.

Ecopetrol S.A. Manual de Descripción de Procesos de la Unidad de Alquilación 2009. Rev0. Barrancabermeja, Colombia. Noviembre, 2009.

Ecopetrol S.A. Manual de inducción: Departamento de Refinación de Crudos. Barrancabermeja, Colombia. 2012.

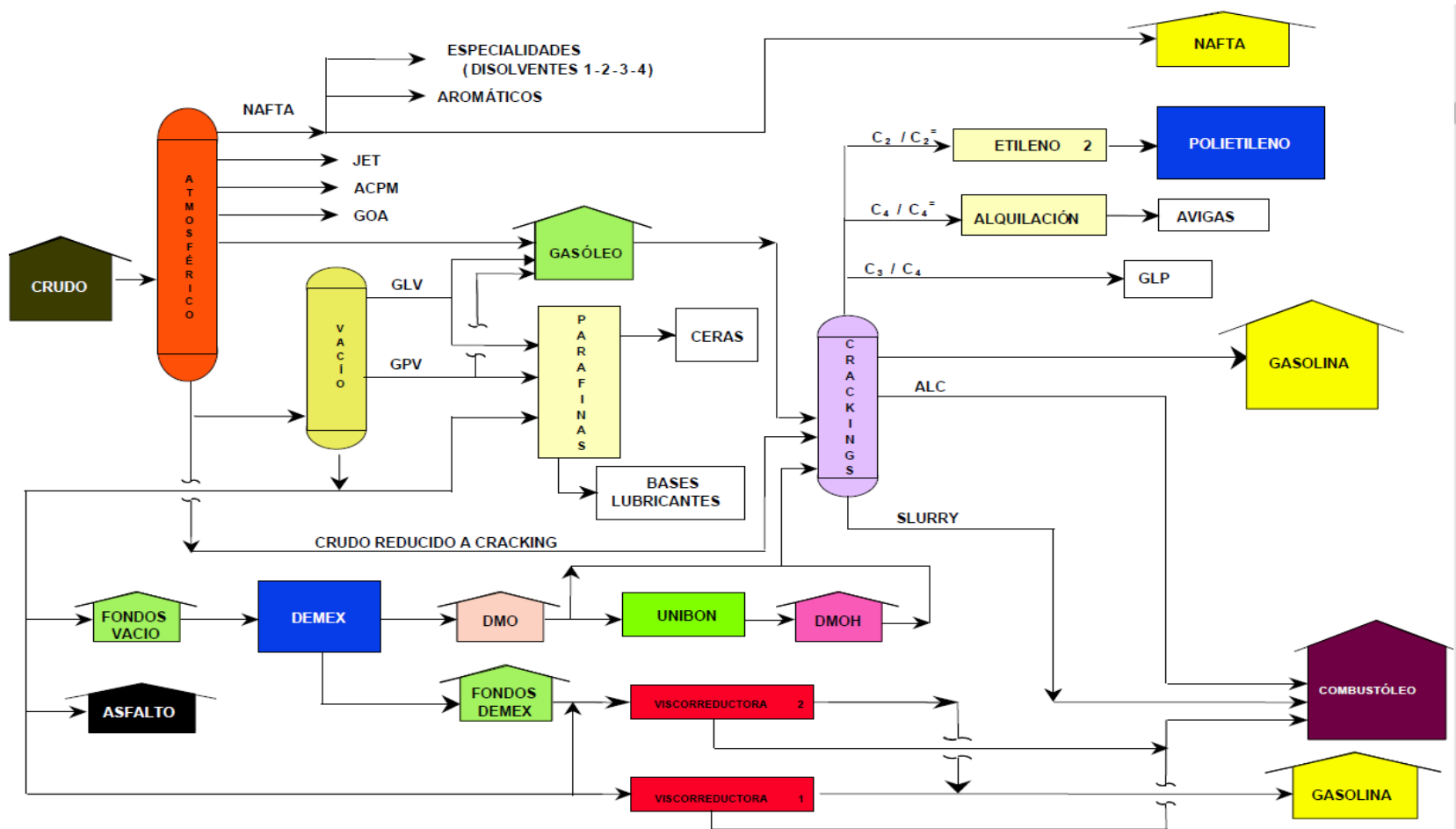
Ecopetrol S.A. Manual técnico de criterios de diseño de la especialidad de Ingeniería de proceso. Versión 1. Barrancabermeja, Colombia. 2010.

LIEBERMAN, Norman. DOFOUR, John. NELSON, William. Centrifugal Pump Source Book. McGraw-Hill, Inc. USA. 1993.

MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos aplicada. Cuarta Edición. México.1996.

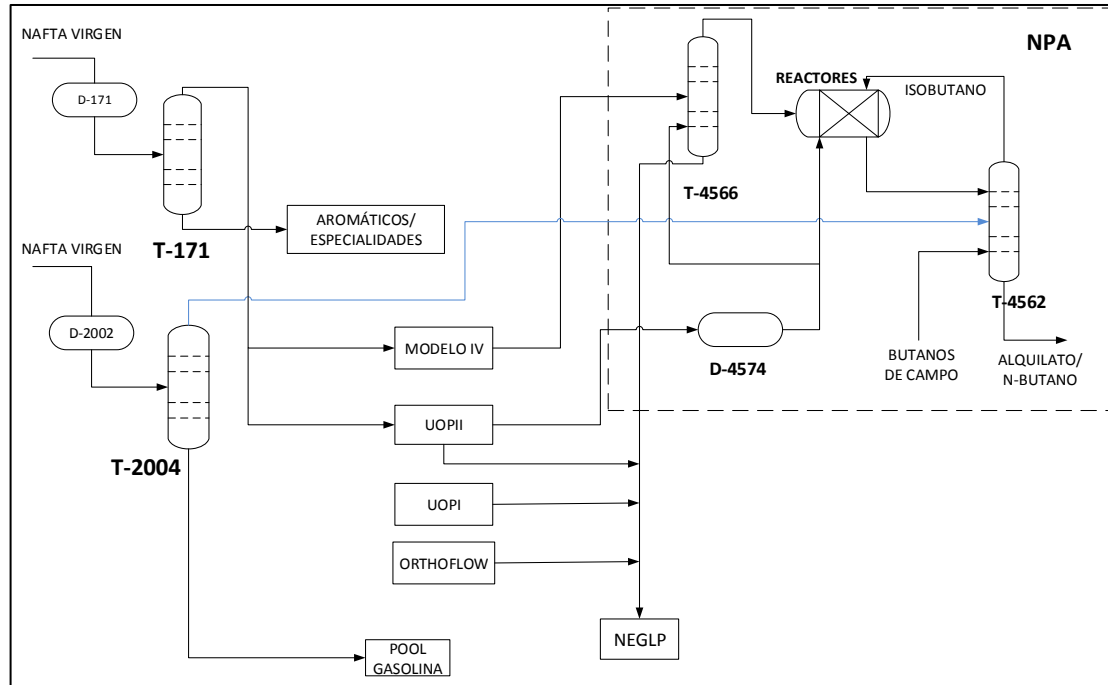
ANEXOS

ANEXO A. Diagrama General de la Refinería de Barrancabermeja

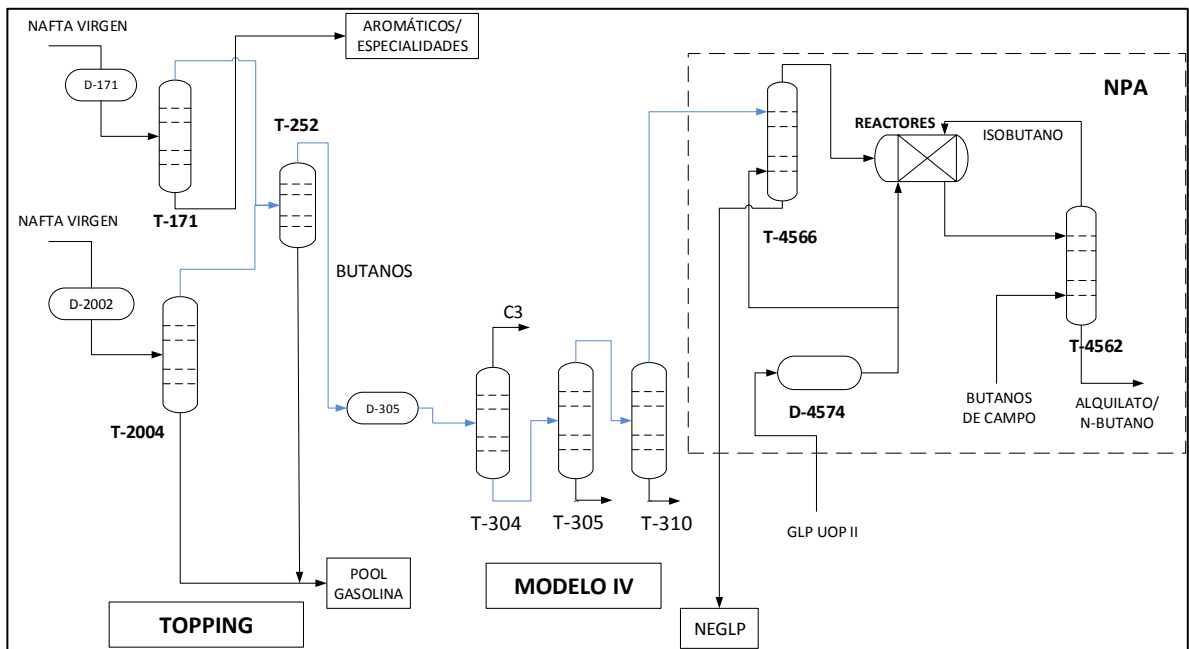


Fuente: Manual de descripción de procesos de la Unidad de Alquilación

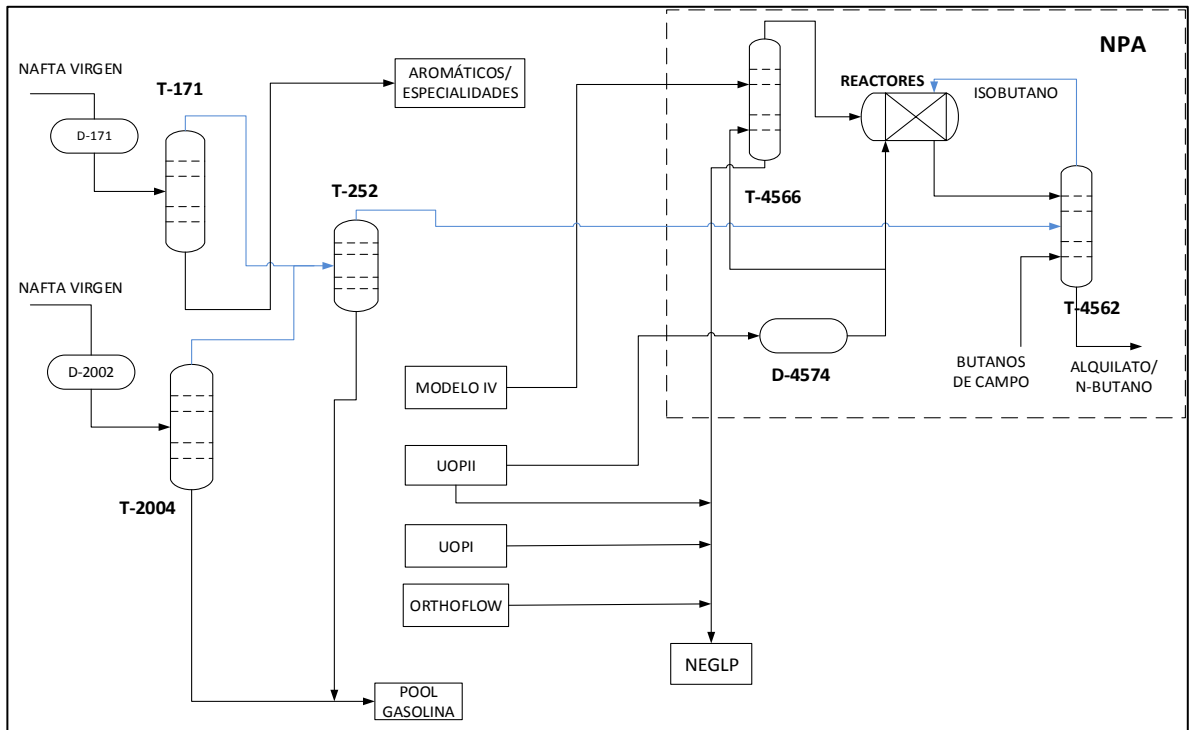
ANEXO B. Esquemas de proceso de alternativas propuestas



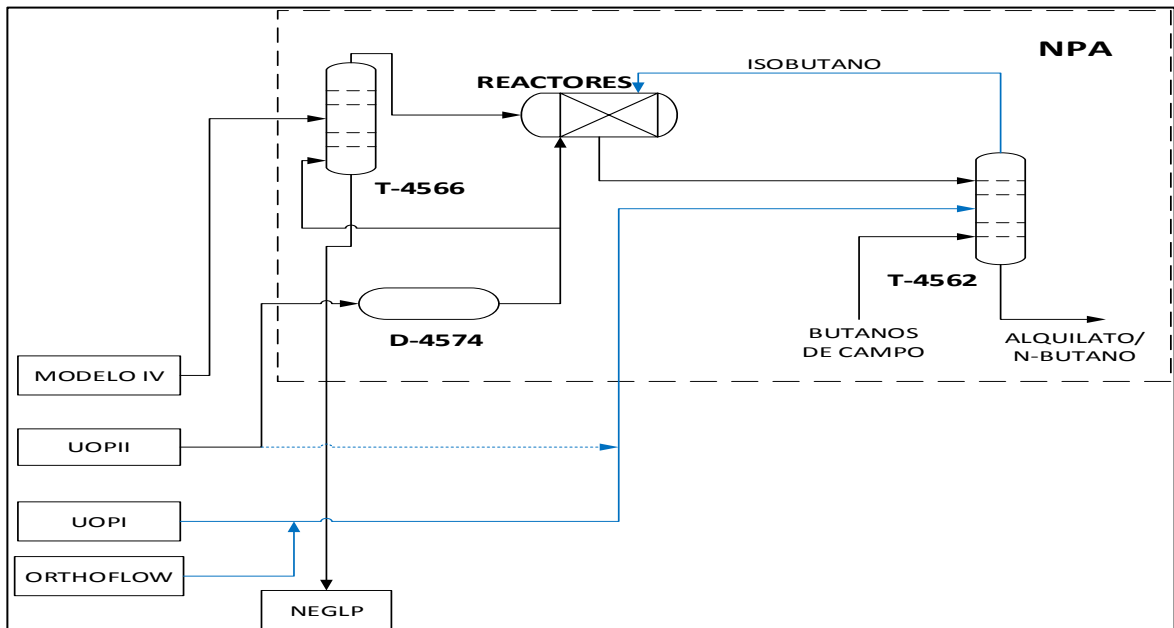
Esquema de proceso Alternativa 1



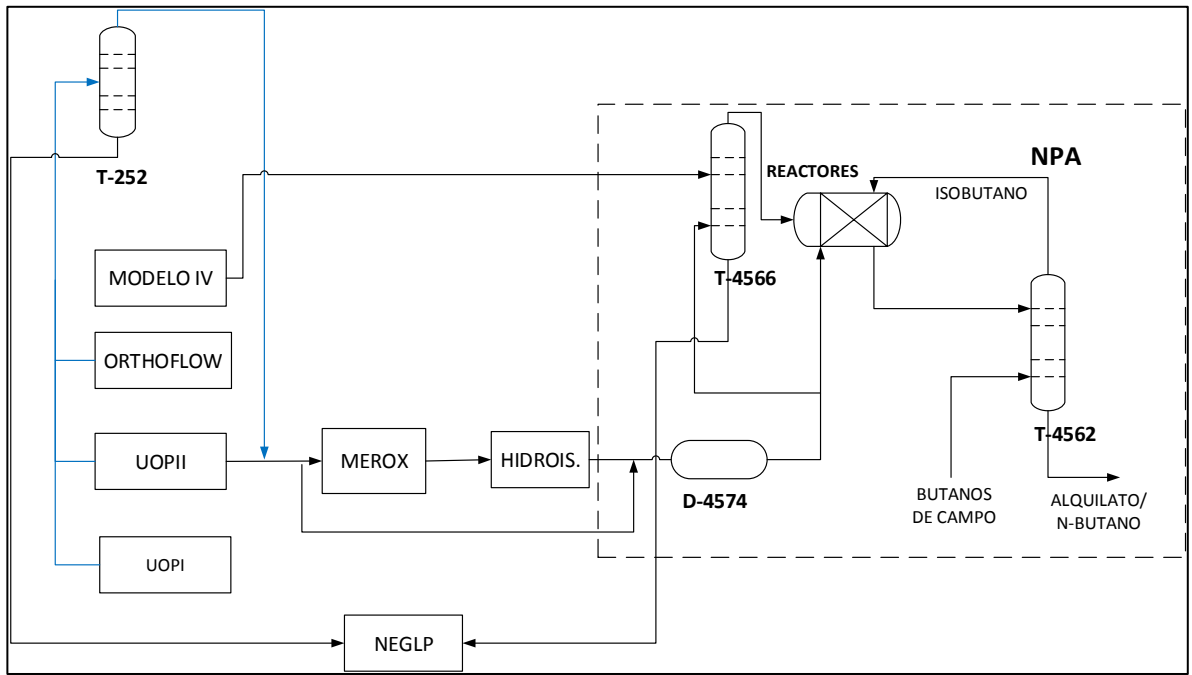
Esquema de proceso Alternativa 2



Esquema de proceso Alternativa 3

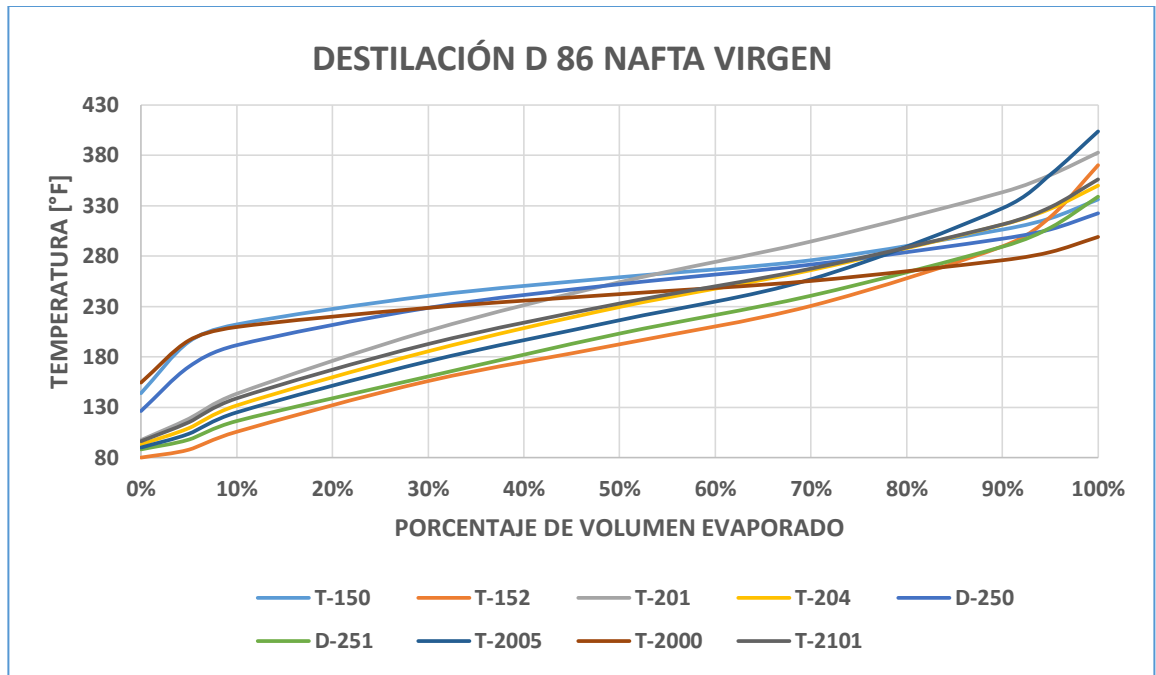


Esquema de proceso Alternativa 4



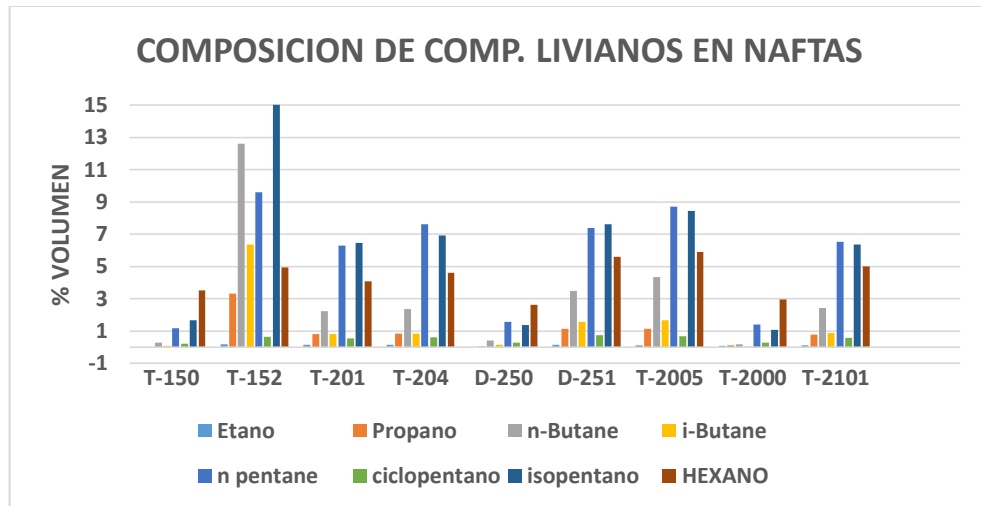
Esquema de proceso Alternativa 5

ANEXO C. Destilación D-86 nafta virgen



CURVA DE DESTILACIÓN D-86 [°F]									
	T-150	T-152	T-201	T-204	T-250 (D250)	T-250 (D251)	T-2005	T-2000	T-2101
Punto inicial ebullición	144	80,1	97,5	93,2	126,3	88,3	90,1	154,6	96,4
5% vol. evaporado	195,1	88	118,7	109,4	170,3	98	103,7	196,4	115,2
10% vol. evaporado	212,3	105,7	143,5	131,8	191,7	116,4	125	209,7	138,9
30% vol. evaporado	240,6	156,1	205,9	185,6	228,7	160,6	175,7	228,7	192,8
50% vol. evaporado	259,1	192,5	254,2	229,6	252,2	203,2	216,4	242,3	233
70% vol. evaporado	275,9	230,6	294,6	266,1	271,7	240,8	257,1	255,4	267,6
90% vol. evaporado	306,4	289,7	343,4	311,2	297,3	289,4	327,6	276	311,5
95% vol. evaporado	317,5	318,8	360,5	327	306,5	308,2	360,9	284,1	328,5
Punto final ebullición	336,3	370,3	382,8	350	322,5	339	403,8	299,1	356,2

ANEXO D. Análisis PIANO Naftas (grupo parafinas e isoparafinas)

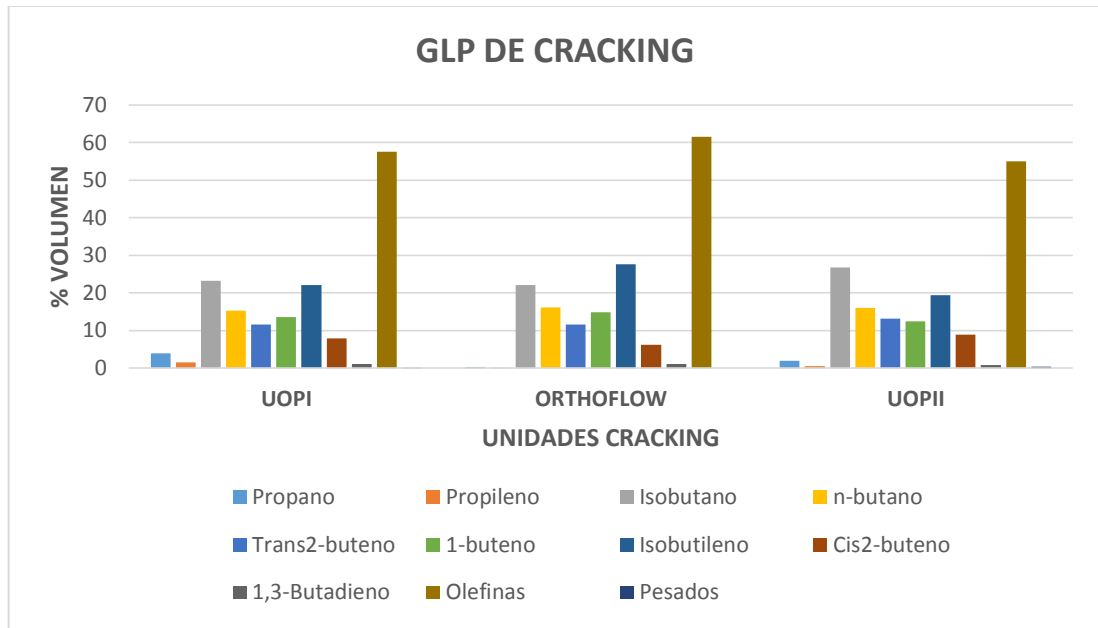


¡Error! Vínculo no válido.

ANEXO E. Cromatografía muestra de corriente de cima de torre T-171, 10/10/2014.



ANEXO F. Composición volumétrica de GLP de Cracking



	UOPI % VOL	ORTHOFLOW % VOL	UOPII % VOL
FLUJOBPD	2400	1800	2000
Etano	0	0	0
Propano	3,92	0,26	1,88
Propileno	1,47	0,13	0,54
Isobutano	23,22	22,14	26,75
n-butano	15,23	16,09	15,94
Trans-2-buteno	11,6	11,61	13,18
1-buteno	13,57	14,81	12,4
Isobutileno	22,02	27,61	19,35
Cis-2-buteno	7,84	6,21	8,83
1,3-Butadieno	1,05	1,14	0,75
Olefinas	57,55	61,51	55,05
Pesados	0,09	0	0,38

ANEXO G: Análisis hidráulico para facilidades nuevas y existentes

VARIABLE	T2004-Banco Tuberías UOP2	T2004-Banco Tuberías #3	Banco Tuberías #3- Casabombas # 5	Casabombas #5- NEGLP
Flujo [gpm]	72	162	162	162
Longitud tubería [ft]	2.919	656	4.593	8.858
Diámetro nominal [in]	3	6	3	6
Schedule	40	40	40	40
Diámetro interno [in]	3,06	6,06	3,06	6,06
Velocidad [ft/s]	3,11	1,8	7	1,79
N° Reynolds	335.529	380.802	755.362	382.102
Caída de presión [psig]	7,4	0,7	72	4,64
Régimen de flujo	Turbulento	Turbulento	Turbulento	Turbulento

¡Error! Vínculo no válido.¡Error! Vínculo no válido.

ANEXO H. Cálculo del NPSH disponible

$$NPSHd = (P + Pa - Pv) * \frac{2,31}{SG} + (H - D - P_f)$$

Donde:

NPSHd: Cabeza neta de succión positiva disponible [ft].

P: Presión sobre el fluido [psig].

Pa: Presión atmosférica [psig].

Pv: Presión de vapor del líquido a la temperatura de trabajo [psig].

2.31: Factor de conversión a ft de agua.

SG: Gravedad específica del fluido a la temperatura de trabajo

H: Altura estática de fluido referente al piso, medida desde el mínimo nivel en el recipiente [ft Liq].

D: Distancia a la línea de control de la boquilla de succión referente al piso [ft Liq].

P_f: Pérdidas por fricción en el sistema de succión [ft Liq].

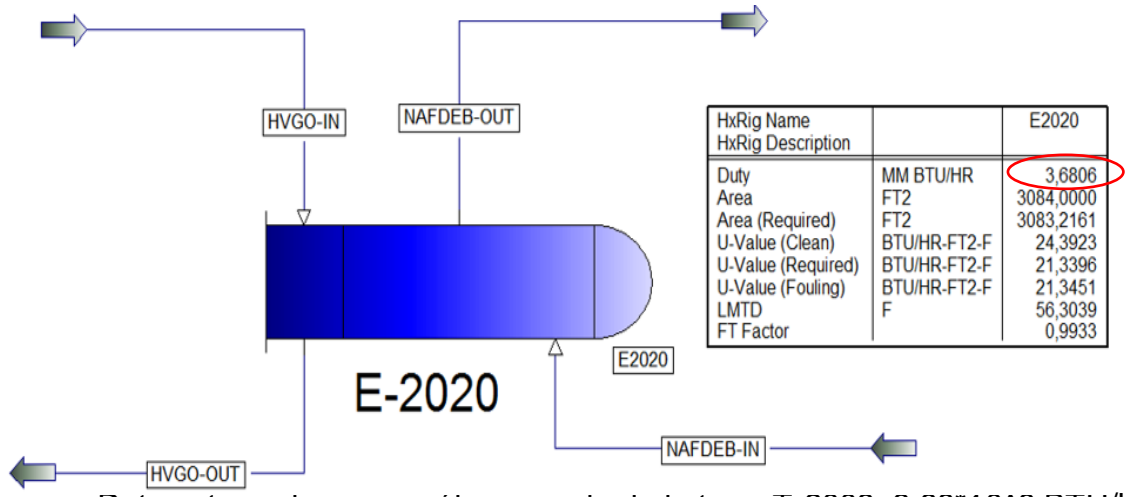
- Para la corriente de cima de la torre T-2004, se considera que el fluido está en equilibrio térmico, por lo tanto $P + Pa$ es aproximadamente igual a Pv .

$$NPSHd = (0) + (6,56 - 14,6 - 2,18) = 19,7 \text{ ft}$$

- Para la corriente de fondo de la torre T-2004:

$$NPSHd = (78,7 - 44) * \frac{2,31}{0,54} + (16,24 - 2,89 - 17,9) = 144 \text{ ft}$$

ANEXO I: Simulación de rehervidor de torre T-2004, E-2020.



- Duty entregado con gasóleo pesado de la torre T-2003: $3,68 \cdot 10^6$ BTU/h
- Duty requerido: $15,1 \cdot 10^6$ BTU/h.

ANEXO J: Precios de venta de productos obtenidos en las alternativas 3 y 5.

PRODUCTO	PRECIO DE VENTA, FEBRERO 2015 [USD\$/bbl]
Gasolina motor regular	46,3
Gasolina motor extra	70,5
GLP	19,5

ANEXO K: Ingreso anual de productos obtenidos en las alternativas 3 y 5.

- Alternativa 3:

CIMA T-252				FONDO T-252	ALIMENTACIÓN T-252
	Alquilato producido	Etano, propano, n-butano y C2-buteno.	Ciclopentano, isopentano y más pesados		
PRECIO DE VENTA	Gasolina Motor Extra	GLP	Gasolina Motor Extra	Gasolina Motor Regular	Gasolina Motor Regular
BPD	700	1.272	287,6	4.000	6.000
USD\$/DIA	49.300	24.812	20.276	185.200	277.800
USD\$/AÑO	17'994.370	9'056.307	7'400.667	67'598.000	101'397.000

- Alternativa 5:

CIMA T-2004			FONDO T-2004	ALIMENTACIÓN T-2004
	Alquilato producido	Propano, n-butano y olefinas		
PRECIO DE VENTA	Gasolina Motor Extra	GLP	GLP	GLP
BPD	1.264	393	4.300	6.200
USD\$/DIA	89.156	7.666	83,85	120,9
USD\$/AÑO	32'542.000	\$2'798.250	30'605.250	44'128.500