

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

YESID ALFONSO PÉREZ MONTERO
CRISTIAN ANDRÉS SANTAMARÍA CADENA

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

2015

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

YESID ALFONSO PÉREZ MONTERO

CRISTIAN ANDRÉS SANTAMARÍA CADENA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Químico

Directora

DEBORA ALCIDA NABARLATZ
Ingeniera Química, Ph.D

Asesor

JHON FREDY CERTUCHE VASQUEZ
Ingeniero de Procesos, MS.c (c)

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BUCARAMANGA

2015

AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a Dios por darnos sabiduría, paciencia, fortaleza y entendimiento para finalizar este proyecto para cumplir la meta que nos propusimos hace ya varios años, graduarnos como ingenieros químicos.

A nuestros padres por apoyarnos desde el inicio de nuestra carrera, y sobre todo en la etapa de realización de este proyecto.

A nuestra directora, Ph. D. Debora Nabarlatz, por su apoyo, confianza, paciencia y orientación a lo largo del proyecto. A la Universidad Industrial de Santander, por ayudarnos a crecer en el saber, y a abrirnos sus puertas para cumplir nuestro objetivo de ser ingenieros.

Al Ingeniero Jhon Certuche, por el conocimiento que compartió con nosotros y por la oportunidad de involucrarnos con uno de los proyectos de modernización de Ecopetrol S.A. en la refinería de Barrancabermeja

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN.....	14
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3. CONCEPTOS TEÓRICOS.....	18
3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO.....	18
3.2 ALQUILACIÓN.....	18
3.2.1 Sección de reacción.....	19
3.2.2 Sección de refrigeración.....	19
3.2.4 Sección de fraccionamiento.....	20
3.3 RECTIFICACIÓN DE ALQUILATO.....	20
3.4 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL ALQUILATO.....	21
3.4.1 PUNTO REAL DE EBULLICIÓN (TBP).....	21
3.4.2 NÚMERO DE OCTANO.....	22
3.4.3 PRESIÓN DE VAPOR REID (RVP).....	23
4. METODOLOGÍA.....	25

4.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS	26
4.1.1 Parámetros Fijos.....	26
4.1.2 Parámetros Manipulables.	27
4.1.3 Parámetros Observables.	27
4.2 RECOPIACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES	27
4.2.1 Curvas de destilación TBP.....	28
4.2.2 Número de Octano (RON).	28
4.2.3 Presión de Vapor Reid (RVP).	28
4.3 MONTAJE SIMULACIÓN HYSYS	28
4.4 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE ALQUILATO.....	29
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
5.1 PROCESAMIENTO DE DATOS EXPERIMENTALES	31
5.2 MONTAJE SIMULACIÓN HYSYS	33
5.3 SIMULACIÓN DE LA TORRE T-4565	34
5.3.1 Resultados de las curvas TBP para las corrientes de entrada y salida....	34
5.3.2 Resultados número de octano de investigación (RON).	37
5.3.3 Resultados presión de vapor reid (RVP).....	39

5.4 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DEL ALQUILATO LIVIANO.....	42
6. CONCLUSIONES	45
BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXOS.....	50

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1 Porcentaje de tiempo muerto de la torre T-4565	15
Figura 2 Factor de utilización de la torre T-4565.....	15
Figura 3 Proceso de Alquilación en la GRB Barrancabermeja.....	19
Figura 4 Curva de TBP de una mezcla con número limitado de componentes	22
Figura 5 Diagrama de bloques de la metodología	22
Figura 6 Montaje torre rectificadora de Alquilato T-4565	34
Figura 7 Curvas de destilación TBP para el alquilato total para los datos experimentales y los obtenidos por simulación.....	35
Figura 8 Curvas de destilación TBP para el alquilato liviano para los datos experimentales y los obtenidos por simulación.....	35
Figura 9 Número de octano de investigación (RON) para las corrientes de alquilato total y alquilato liviano.....	37
Figura 10 Número de investigación (RON) para datos simulados, experimentales y ajustados	38
Figura 11 Presión de vapor Reid (RVP) Alquilato	39
Figura 12 Presión de Vapor Reid (RVP) para las diferentes muestras de alquilato total y alquilato liviano.....	40
Figura 13 Presión de vapor Reid (RVP) para datos simulados, experimentales y ajustados	42
Figura 14 Influencia de los distintos cortes de operación en las curvas TBP del alquilato liviano obtenido.....	43
Figura 15 Comportamiento de RVP y RON vs corte de operación	43

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1 Parámetros de diseño de entrada para la simulación	31
Tabla 2 Condiciones de operación de la torre T-4565 correspondientes a los días de toma de muestra	32
Tabla 3 Resumen datos experimentales de Alquilerato Total y Alquilerato Liviano (9 muestras en total).	32
Tabla 4 Error relativo porcentual de la simulación	36
Tabla A 1 Factor de utilización de la torre T-4565 en los últimos 5 años	50
Tabla A 2 Tiempo muerto de la torre T-4565 en los últimos 5 años.....	50
Tabla A 3 Parámetros de diseño y condiciones de operación de la torre	51
Tabla A 4 Datos experimentales de TBP para la corriente alquilerato total	53
Tabla A 5 Datos experimentales de TBP para la corriente alquilerato liviano	54
Tabla A 6 Resultados de las simulaciones alquilerato liviano	55
Tabla A 7 Resumen de errores absolutos e incerteza del alquilerato liviano en Hysys	56
Tabla A 8 Resumen de datos para la determinación de R^2	58
Tabla A 9 Resumen de cálculos para la determinación del factor de corrección del RON	58
Tabla A 10 Resumen de los cálculos realizados para la estimación del factor de corrección del RVP	59
Tabla A 11 Resumen de los componentes reportados en el PIANO para el Alquilerato Total.....	60
Tabla A 12 Resultados variación de cortes de operación T-4565 (re-run).....	62

LISTA DE ANEXOS

Pág

ANEXO A. PORCENTAJE DE UTILIZACIÓN Y DE TIEMPO MUERTO.	50
ANEXO B. DISEÑO DE LA TORRE DE RECTIFICACIÓN T-4564.	51
ANEXO C. RESULTADO DE ANÁLISIS DE MUESTRAS	53
ANEXO D. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES Y CÁLCULOS ESTADÍSTICOS.....	55
ANEXO E RESUMEN PIANO ALQUILATO TOTAL	60
ANEXO F VARIACIÓN CORTES DE OPERACIÓN	62

RESUMEN

TITULO: 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*

AUTORES: YESID ALFONSO PÉREZ MONTERO
CRISTIAN ANDRÉS SANTAMARÍA CADENA**

PALABRAS CLAVE: Alquilato, Curvas de Destilación TBP, Número de Octano de Investigación y Presión de Vapor Reid.

DESCRIPCION: La refinería de Barrancabermeja se encuentra en un proceso de modernización en donde el objetivo principal de este proyecto es agregar valor a Ecopetrol. Uno de los equipos que hace parte de esta modernización es la torre rectificadora de alquilato T-4565 (re-run), la cual ha venido presentando diversos inconvenientes debido a su poco uso y a su utilización por debajo de las condiciones de diseño. Dentro de la refinería se proponen dos alternativas de solución ante esta problemática, la primera consiste en ingresar otra corriente a la torre rectificadora para disminuir el porcentaje de azufre en esta corriente mientras no esté en uso, la segunda consiste en ingresar junto con la corriente de alimentación otra corriente de características similares para producir más alquilato liviano.

En este trabajo se pretende contribuir a estas alternativas de solución simulando el estado actual de la torre rectificadora de alquilato T-4565 mediante datos correspondientes a curvas TBP, RON y TPB para las corrientes de entrada y salida de interés de la torre rectificadora, los cuales corresponden a nueve muestras tomadas entre los meses de Junio y Julio, así como los datos de especificaciones de diseño. Luego de la simulación del estado actual de la torre rectificadora se analizaron datos de TBP, RON y RVP como respuesta de la simulación del estado actual y ante cambios en el porcentaje de fraccionamiento, comparándolos con los datos suministrados. A partir de la comparación fue construido un factor de ajuste para los parámetros, RON y RVP. De los resultados obtenidos se concluye que la simulación del estado actual se adecua bien ante el parámetro de TBP, pero para los parámetros de RON y RVP se realizó un factor de ajuste para predecir mejor el comportamiento de los datos suministrados.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Directora: Ph.D Debora Alcida Nabarlantz

ABSTRACT

TITLE: ASSESSMENT OF THE CURRENT STATE OF OPERATION OF THE ALKYLATE GRINDER TOWER T-4565 (RE-RUN) IN REFINERÍA BARRANCABERMEJA THROUGH ITS SIMULATION IN ASPEN HYSYS*

AUTORES: YESID ALFONSO PÉREZ MONTERO
CRISTIAN ANDRÉS SANTAMARÍA CADENA**

PALABRAS CLAVE: Alkylate, TBP curves of distillation, research octane number (RON) and Reid vapor pressure (RVP).

DESCRIPCION: The Barrancabermeja refinery is located in a process of modernization in where the main objective of this project is to add value to Ecopetrol. One of the teams that is part of this modernization is the tower of alkylate grinder T-4565 (re-run), which has been presenting various disadvantages due to their low usage and its use under design conditions. Within the refinery the Commission proposes two alternatives of solution to this problem, the first is to enter another current tower to the grinder to reduce the percentage of sulfur in this current while not in use, the second is to enter along with the current supply of another current of similar characteristics to produce more alkylate light.

In this work is intended to contribute to these alternatives of solution by simulating the current status of the alkylate grinder tower T-4565 through data corresponding to curves TBP, Ron and TPB for the inflows and outflows of interest of the tower grinder, which correspond to nines samples taken between the months of June and July, as well as the data of design specifications. After the simulation of the current state of the tower rectifier is analyzed data from TBP, Ron and RVP as a response to the simulation of the current state and to changes in the percentage of fractionation, comparing them with the data supplied. From the comparison was built an adjustment factor for the parameters, Ron and RVP. On the obtained results, it is concluded that the simulation of the current state is well-suited to the parameter of TBP, but for the parameters of RON and RVP was an adjustment factor to better predict the behavior of the data supplied.

* Work Degree

** Faculty of Physical-Chemical Engineering. Department of Chemical Engineering. Director: Ph.D Debora Alcida Nabarlatz

INTRODUCCIÓN

Ecopetrol S.A. es una de las empresas más grandes del país y la principal compañía petrolera en Colombia; debido a su tamaño Ecopetrol S.A, se encuentra entre las 50 empresas petroleras más grandes del mundo, y figura en el top 5 de dichas empresas en Latinoamérica (ECOPETROL S.A., 2014). Dentro de la empresa, la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB) lleva a cabo procesos de refinación en donde se destacan la obtención de gasolina motor (corriente y extra), diésel, queroseno, avigas, GLP, lubricantes entre otros (ECOPETROL S.A., 2014).

La GRB se encuentra en un proceso de modernización en donde el objetivo principal de este proyecto es agregar valor a Ecopetrol (PINTO S., 2011). En búsqueda de lograr dicho objetivo, Ecopetrol ha realizado una alianza estratégica con la Universidad Industrial de Santander, con el fin de producir innovaciones de alto impacto para esta industria, que le genere valor agregado a esta empresa (ECOPETROL S.A., 2015).

Dentro de los equipos a intervenir se encuentra la torre rectificadora de alquilato T-4565 (re-run), la cual ha venido presentando diversos inconvenientes debido a su poco uso y a su utilización por debajo de las condiciones de diseño. Al analizar el porcentaje de tiempo muerto desde el año 2010 (Figura 1) se presenta un promedio de 60.7% de tiempo muerto por año, así como un 61.7% de uso de capacidad instalada (Figura 2). El cálculo de estos valores se presenta en el Anexo A. Como solución a este problema se ha planteado incrementar la producción de alquilato liviano, el cual es el producto principal de esta torre, mediante la mezcla de alquilato total con una corriente de propiedades similares tales como la nafta craqueada, que permita incrementar tanto el tiempo de uso de

la torre así como el aprovechamiento de la capacidad instalada (CERTUCHE VAZQUEZ, 2014).

Figura 1 Porcentaje de tiempo muerto de la torre T-4565



Figura 2 Factor de utilización de la torre T-4565



La viabilidad de este proyecto debe verificarse mediante diversas pruebas, para determinar el comportamiento de las propiedades del alquiler liviano ante las

mezclas. Dado que el alquilato liviano es la materia prima obtenido como producto en la T-4565 y es el insumo principal para la producción del Avigas (combustible para aviones con mayor costo, posiblemente por encima incluso del combustible tipo jet), se requiere un control estricto de ciertas propiedades en el producto final, tales como punto real de ebullición, presión de vapor Reid y número de octano.

Debido a esto, se hace necesario el uso de herramientas de simulación para tener un acercamiento al comportamiento real de la torre en las condiciones en las que opera actualmente, con el objetivo de tener un escenario base sobre el cual se puedan realizar mejoras al proceso y evaluación y la evaluación de nuevas corrientes en la empresa. Para ello se realizará la simulación en Aspen Hysys, el cual es tal vez la herramienta de modelado de procesos más utilizada por los principales productores mundiales de petróleo y gas, refinerías y empresas que requieren de la simulación de sus procesos petroquímicos y la optimización de sus operaciones (GIL, 2013).

El alcance de este trabajo se centra en la simulación del estado actual de la torre rectificadora de alquilato T-4565 (re-run) y la evaluación de parámetros de calidad del alquilato liviano, tales como curvas de destilación TBP, el número de octano de investigación (RON por sus siglas en inglés Research Octane Number) y la presión de vapor reid (RVP por sus siglas en inglés Reid Vapor Pressure), obtenidos a partir de la simulación de la torre como herramienta para futuros trabajos que se realizarán en dicho equipo. Se busca contribuir generando un punto de partida para el proceso de modernización e incremento de la productividad de este equipo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar los resultados de operación actual de la torre rectificadora de alquilato T-4565 (re-run) en la refinería de Barrancabermeja mediante su simulación en Aspen Hysys.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir los parámetros de la torre rectificadora de alquilato que se usaran para la simulación.
- Realizar la simulación del estado actual de la torre rectificadora de alquilato.
- Analizar las curvas de destilación TBP obtenidas en la simulación de la torre rectificadora de alquilato.
- Analizar el comportamiento de parámetros del alquilato liviano tales como el RON y el RVP.
- Observar el comportamiento de los parámetros de calidad ante variaciones en el porcentaje de fraccionamiento.

3. CONCEPTOS TEÓRICOS

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO

La refinación es un proceso donde el petróleo se somete inicialmente a una etapa de destilación y luego a procesos químicos como el craqueo, que permiten extraer buena parte de los componentes que contiene.

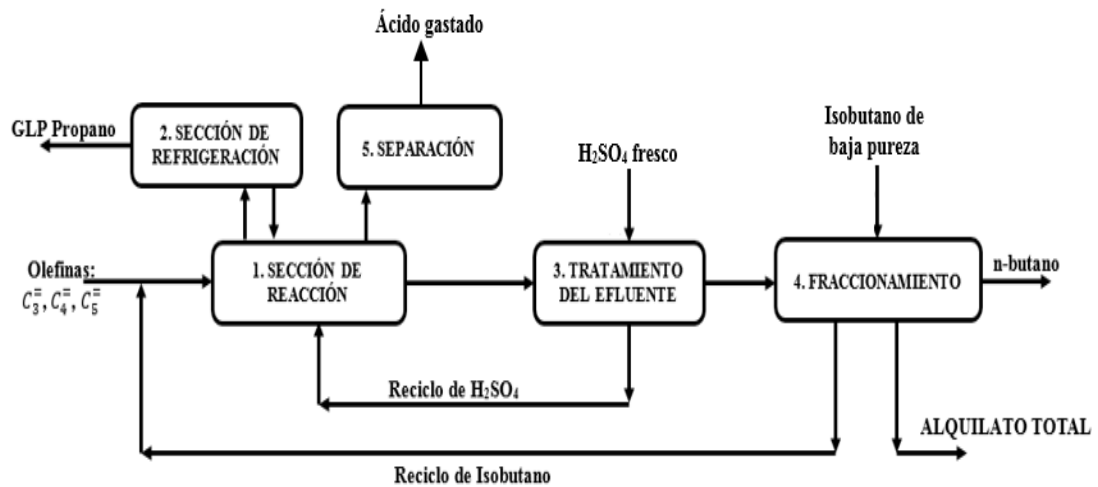
El petróleo tiene una gran variedad de compuestos, que pueden clasificarse en cuatro categorías: parafínico, nafténico, asfáltico o mixto y aromático. Los productos que se sacan del proceso de refinación se llaman derivados y los hay de dos tipos: los combustibles, como la gasolina, A.C.P.M., etc.; y los petroquímicos, tales como polietileno, benceno, etc. (MANCILLA ESTUPIÑAN, 2014)

3.2 ALQUILACIÓN

La alquilación es el proceso que tiene como objetivo producir gasolina a partir de olefinas como propilenos ($C_3^=$), butileno ($C_4^=$) y penteno ($C_5^=$), e isobutano. La olefina más empleada para la producción a nivel industrial es el butileno, ya que supone una alta calidad del alquilato producido. El proceso de alquilación es catalizado a través de un ácido fuerte; a nivel industrial los ácidos más usados son el H_2SO_4 y el HF (Aurora, 2014). Dentro de la refinería de Barrancabermeja, Ecopetrol S.A emplea el proceso STRATCO de alquilación, donde se usa como catalizador H_2SO_4 . Este proceso consta de las siguientes secciones, las cuales se resumen en la Figura 3.

3.2.1 Sección de reacción. En esta sección se ponen en contacto los hidrocarburos y el catalizador, ácido sulfúrico, en condiciones controladas donde se asegura que los hidrocarburos se encuentren en fase líquida dentro del reactor.

Figura 3 Proceso de Alquilación en la GRB Barrancabermeja



Fuente: Base de datos de procesos de operación Ecopetrol S.A. Traducida por los Autores

3.2.2 Sección de refrigeración. En esta sección se remueven el calor de la reacción y los productos livianos de la sección de reacción.

3.2.3 Sección de tratamiento del efluente. En esta sección se remueven el ácido libre, los sulfatos de alquilo y sulfatos de di-alquilo del efluente de salida neto del reactor para posteriormente evitar corrosión e incrustaciones en los equipos que se ven involucrados más adelante.

3.2.4 Sección de fraccionamiento. En esta sección se recupera el isobutano que no reaccionó para posteriormente recircularlo a la sección de reacción. Los hidrocarburos livianos remanentes son separados de los productos pesados.

3.2.5 Sección de separación. En esta sección se desgasifica el ácido gastado, se ajusta el pH del agua residual y las corrientes de venteo ácidas se neutralizan antes de enviarlas fuera de la planta.

Dentro de la sección de fraccionamiento se encuentra la torre rectificadora de alquilato, en la cual se obtiene alquilato liviano, el cual luego de adicionarle tetraetilo de plomo se convierte en AVIGAS (gasolina de aviación para uso en motores de combustión interna). La torre rectificadora de alquilato se alimenta con una corriente proveniente de una torre deisobutanizadora, la cual es precalentada antes de ingresar a la torre rectificadora. El producto obtenido en la cima de la torre rectificadora es el Alquilato Liviano y el producto obtenido por el fondo de la torre es Alquilato Pesado.

Los vapores de cima de la torre rectificadora de alquilato se condensan en los condensadores a través del uso de agua de enfriamiento. Una parte del líquido que se condensa, se envía como reflujo al plato superior de la torre. El resto del líquido se envía al enfriador de alquilato de aviación para posteriormente ser enviado al tambor lavador cáustico de alquilato.

3.3 RECTIFICACIÓN DE ALQUILATO

La torre de destilación de alquilato consta de tres corrientes, una de entrada y dos de salida. La corriente de alimentación, denominada Alquilato Total, proviene de la torre deisobutanizadora, de la sección de alquilación. La corriente de interés es la

corriente de cima, la cual se denomina Alquilato Liviano. El alquilato pesado, se integra energéticamente con la corriente de entrada, para su posterior enfriamiento y envió a los tanques de almacenamiento.

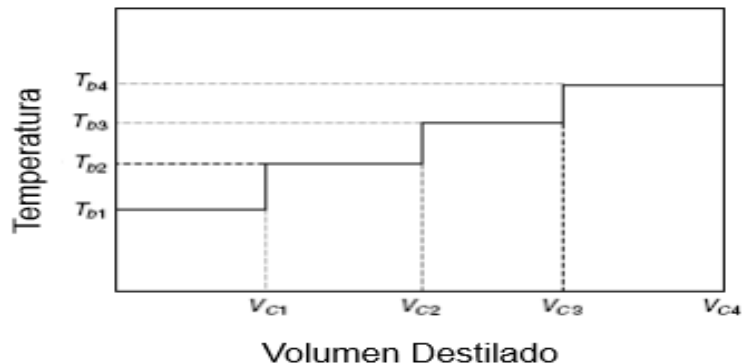
La unidad rectificadora de alquilato cuenta con un total de 20 platos, donde el plato número 8 es aquel que recibe la corriente de alimentación. La torre posee un diámetro de 3.5 ft, una altura de torre de 54.17 ft, una distancia entre plato y plato de 2 ft; cuenta con un condensador (E-4587), que opera con agua de enfriamiento y un rehervidor (E-4583), que opera con vapor de agua de calentamiento.

3.4 PARÁMETROS DE CALIDAD DEL ALQUILATO

La gasolina de aviación, también conocida como alquilato, debe cumplir con ciertas especificaciones para su venta dentro de las cuales se encuentran parámetros como punto real de ebullición, número de octano de investigación, presión de vapor reid, contenido de azufre, calor neto de combustión, densidad, entre otros. Los parámetros escogidos como objeto de estudio son el punto real de ebullición, número de octano de investigación y presión de vapor reid.

3.4.1 Punto Real de Ebullición (TBP). Para un proceso de destilación por lotes donde se produce la separación de los componentes de una mezcla, la curva de destilación puede ser representada por un número de pasos igual al número de componentes en la mezcla (Figura 5). 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.

Figura 4 Curva de TBP de una mezcla con número



Donde 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).

Para el caso donde la mezcla a examinar posea muchos componentes, la curva de destilación tiende a fundirse en una curva suave. La curva TBP se utiliza generalmente como una base para la caracterización de petróleo crudo o un producto de petróleo para el propósito de diseño y/o análisis (FAHIM, ALSAHHAF, & ELKILANI, 2010).

3.4.2 Número de Octano. El número de octano de una gasolina de motor es una de las medidas más importantes de la calidad de la gasolina. Siempre ha sido un objetivo importante de las refinerías el predecir con exactitud los índices de octano de las mezclas de gasolinas.

Los números de octano de investigación y motor de una gasolina son mediciones de la calidad de su rendimiento como combustible. La propia escala de número de

octano se basa en la combinación lineal de iso-octano y n-heptano. El número de octano de una gasolina se mide en una escala que va desde tener iso-octano puro (número de octano de 100) a la de n-heptano puro (número de octano de 0). El número de octano se ve afectado por el contenido de compuestos saturados, aromáticos y olefinas de la gasolina. (COON & TWU, 2012).

Para la determinación del número de octano existen dos procedimientos normalizados: el método "Research" (por sus siglas en inglés Research Octane Number) y el método "Motor" (por sus siglas en inglés Motor Octane Number). La principal diferencia entre los dos procedimientos RON y MON estriba sustancialmente en el régimen de rotación del motor, temperatura de admisión al motor y avance de encendido. La mayor parte de las gasolinas y supercarburantes clásicos tienen un RON comprendido entre 90 y 100, mientras que el MON se sitúa entre 80 y 90 (WAUQUIER, 2004).

El número de octano que se reporta es el promedio del RON y el MON. En el caso del Avigas; dichos parámetros presentan el mismo valor.

3.4.3 Presión de Vapor Reid (RVP). La volatilidad es una característica importante de los combustibles derivados del petróleo, especialmente para las gasolinas. Las gasolinas se producen en estado líquido, pero éstas se consumen dentro del motor en estado gaseoso. En consecuencia, la volatilidad de la gasolina debe ser lo suficientemente alta para asegurar que el motor funcione correctamente. Esta volatilidad debe estar restringida para evitar el bloqueo de vapor, pérdidas por evaporación, contaminación del aire, manejo y almacenamiento inseguro de gases (RIAZI, 2003).

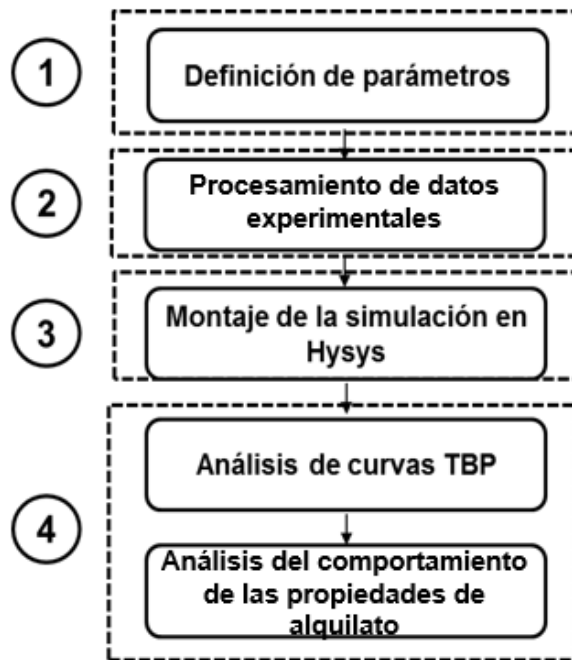
La presión de vapor Reid (o por sus siglas en inglés, RVP) se utiliza con frecuencia como una indicación de la volatilidad de los hidrocarburos líquidos. El RVP se define como la presión absoluta (es decir, psia o bar) ejercida por una mezcla, determinada a 100°F (37.8°C) y a una relación volumétrica de vapor a líquido de 4 (FAHIM, ALSAHHAF, & ELKILANI, 2010).

4. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo se divide en cuatro partes, tal como se muestra en la Figura 5.

- 1) Se definen todos los parámetros que intervienen en la operación de la torre y características de las corrientes.
- 2) Se procesan los datos experimentales suministrados, tales como las curvas de destilación TBP, valores de RON y RVP para la corriente de entrada y salida de livianos en la torre junto con los datos de operación y diseño de la torre.
- 3) Se realiza el montaje del estado de operación actual de la torre 4565 (re-run) para cada una de las muestras suministradas, en el simulador Aspen Hysys.
- 4) Se comparan los datos obtenidos por el simulador con los datos suministrados por las muestras de laboratorio y se analizan los valores del RON y el RVP para identificar características que afecten a estos dos parámetros de calidad en la simulación por Aspen Hysys.

Figura 5 Diagrama de bloques de la metodología



4.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

Según la literatura son muchas las variables o parámetros que influyen en el diseño, funcionamiento y operación de una torre de destilación. Para facilitar el manejo de la información las variables que se involucran en esta operación se clasifican en parámetros fijos, manipulables y observables. Todos los parámetros que se ven involucrados en la simulación fueron suministrados de la base de datos de Ecopetrol S.A.

4.1.1 Parámetros Fijos. Para este caso los parámetros fijos se dividen en dos, parámetros de diseño y parámetros de operación.

Dentro de los parámetros de diseño se encuentran el diámetro de la torre, altura de la torre, número de platos y tipo de platos. Por otro lado, en el grupo de los

parámetros de operación que permanecerán constantes se encuentran la caída de presión de los platos, del rehervidor 4587 y del condensador E4583 y la presión de la corriente de alimentación. Un resumen de estos datos se presenta en el Anexo B.

4.1.2 Parámetros Manipulables. En este caso se presentan nueve parámetros manipulables, el flujo de Alquilate Total, las temperaturas de entrada a la torre; las temperaturas de salida del condensador y de los platos 1,18 y 20; y por último el reflujo de Alquilate Liviano junto con el flujo de salida por el tope.

4.1.3 Parámetros Observables. Las principales propiedades que definen el Alquilate Liviano son la curva de destilación TBP para los diferentes cortes, el número de octano de investigación (RON), y la presión de vapor Reid (RVP), por lo cual éstas se definieron como variables de estudio.

4.2 RECOPIACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES

Para desarrollar el estudio, fueron suministrados un total de 18 reportes de muestras, 9 de las cuales corresponden a la corriente de Alquilate Total y las otras 9 pertenecen a la corriente de Alquilate Liviano. Las muestras se tomaron aleatoriamente en un espacio de aproximadamente dos meses, dando comienzo el 1 de junio y finalizando el 31 de julio de 2015. Para cada muestra se analizaron los siguientes parámetros:

4.2.1 Curvas de destilación TBP. Las curvas de destilación TBP se realizaron siguiendo los parámetros de la norma ASTM D-86. Las pruebas fueron realizadas en los laboratorios de Ecopetrol S.A.

4.2.2 Número de Octano (RON). Para la determinación del número de octano, se usó únicamente el RON, ya que para el alquilato tanto el RON, como el MON es el mismo. El cálculo de número de octano de investigación (RON) se realizó de acuerdo a la metodología planteada por la norma ASTM D 2699. Las pruebas fueron realizadas en los laboratorios de Ecopetrol S.A.

4.2.3 Presión de Vapor Reid (RVP). La determinación de la Presión de Vapor Reid (RVP) se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM D 2699. Las pruebas fueron realizadas en los laboratorios de Ecopetrol S.A.

4.3 MONTAJE SIMULACIÓN HYSYS

La simulación se llevó a cabo utilizando el software Aspen Hysys 8.2. Siguiendo los siguientes pasos.

- a) Selección del paquete termodinámico: el paquete termodinámico seleccionado fue Peng Robinson (PR), debido a que es el más recomendado para productos petroquímicos (ASPEN TECH, 2015).

- b) Crear pseudocomponentes: usando la herramienta Oil Manager se crea un nuevo Assay, donde el tipo de datos a suministrar es TBP. Se ingresaron los cortes correspondientes a la corriente de alquilato total.

c) Instalación de la corriente: una vez creado los pseudocomponentes, con la opción output blend se instala la corriente en el ambiente de simulación. En esta corriente no se han definido aún la temperatura, caudal ni presión de la misma.

d) Ingreso de datos de operación de la corriente de entrada.

e) Montaje de la torre: se utilizó una torre con condensación total a la que se alimenta una corriente de alquilato total y de la que se extrae alquilato liviano (cima) y alquilato pesado (fondo). Se ingresaron los datos de diseño de esta los cuales se resumen en el Anexo B. Como parámetros operacionales se ingresaron el reflujo de alquilato liviano, el caudal de salida de alquilato liviano, la presión del condensador y las temperaturas de salida de la torre 18 de los platos 1, 18 y 20. Posterior a esto se empieza con la simulación de la torre.

f) Este procedimiento se realiza para cada una de las 9 muestras suministradas.

Para la simulación, Aspen Hysys cuenta con una herramienta denominada OIL MANAGER que permite caracterizar un crudo o sus derivados creando componentes hipotéticos o pseudocomponentes.

4.4 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DE ALQUILATO

Los parámetros de calidad son un factor importante dentro de las propiedades de los combustibles. Determinar su comportamiento ante las alteraciones de las

condiciones de operación es necesario, de manera que ante los cambios puedan tomarse las medidas necesarias para su corrección.

La variación de la relación existente entre el flujo de la corriente de entrada de alquilato total a la torre y el flujo de la corriente de salida de alquilato liviano, determina el fraccionamiento de los compuestos en la torre, por lo que ésta se considerará como una variable crítica de operación. Dicha relación está dada por un porcentaje denominado porcentaje de fraccionamiento. Para determinar este porcentaje se eligió una de las muestras al azar y se determinó el corte de operación. Una vez calculado dicho valor se crearan 4 cortes de operación, dos valores superiores y dos valores inferiores en un rango de 5%.

Para determinar el porcentaje de fraccionamiento se modificará el flujo de alquilato liviano que sale de la torre T-4565 (re-run) obteniendo por los porcentajes planteados.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 PROCESAMIENTO DE DATOS EXPERIMENTALES

Para simular el equipo se hizo necesario el suministro de datos relacionados con el diseño y especificaciones de la torre de destilación por parte de Ecopetrol S.A, los cuales se resumen en la tabla 1.

Tabla 1 Parámetros de diseño de entrada para la simulación

Parámetro	Unidad	Valor
Flujo Entrada Máximo	barril/día	2000
Flujo Máximo de Salida del Tope	barril/día	1800
Flujo Máximo de Salida del Fondo	barril/día	200
Numero de Platos	Platos	20
Diámetro de la torre	ft	3,5
Altura de la torre	ft	54,17
Espacio entre platos	ft	2

Para la simulación de la torre de destilación, se suministraron datos concernientes a los históricos recientes de las condiciones de operación de la torre, medidos en los días en que se tomaron las muestras de alquilato total y de alquilato liviano; estos datos se resumen en la tabla 2.

Tabla 2 Condiciones de operación de la torre T-4565 correspondientes a los días de toma de muestra

CONDICIONES DE OPERACIÓN										
Unidad	Parámetro	MUESTRAS								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
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

Los datos solicitados pertenecientes a la curva de destilación de TBP, correspondientes a las muestras de alquilato total, y alquilato liviano, fueron determinados mediante el método ASTM D 86. Para el análisis del RVP y RON se aplicaron los métodos ASTM D 5191 y ASTM D 2699 respectivamente. Un análisis de los datos suministrados por los laboratorios de Ecopetrol S.A se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3 Resumen datos experimentales de Alquilato Total y Alquilato Liviano (9 muestras en total).

Unidad	Componente	Alquilato Total		Alquilato Liviano	
		Datos	ε (°F)	Datos	ε (°F)
°F	PTO INICIAL DE EBULLICION	92.6 ± 10.7	3.6	97.4 ± 1.7	0.6
°F	10%vol EVAPORADO	155.7 ± 4.6	1.5	153.7 ± 5.5	1.8
°F	40%vol EVAPORADO	213.8 ± 2.4	0.8	208.4 ± 3.4	1.1
°F	50%vol EVAPORADO	220.7 ± 1.6	0.5	214.9 ± 2.3	0.8
°F	70%vol EVAPORADO	229.3 ± 1.7	0.6	NR	NR
°F	80%vol EVAPORADO	250.3 ± 4.4	1.5	NR	NR
°F	90%vol EVAPORADO	284.2 ± 6.1	2.0	229.9 ± 1.8	0.6
°F	PTO FINAL DE EBULLICION	438.0 ± 10.2	3.4	263.5 ± 5.3	1.8
psi	PRESION DE VAPOR REID	6.55 ± 2.42	0.81	6.84 ± 0.41	0.14
-	RESEARCH OCTANE NUMBER	94.7 ± 0.5	0.2	94.6 ± 0.5	0.2

Como puede observarse las curvas de destilación TBP, no presentan grandes desviaciones en su comportamiento, ya que no presentan desviaciones superiores al 10% de su valor promedio.

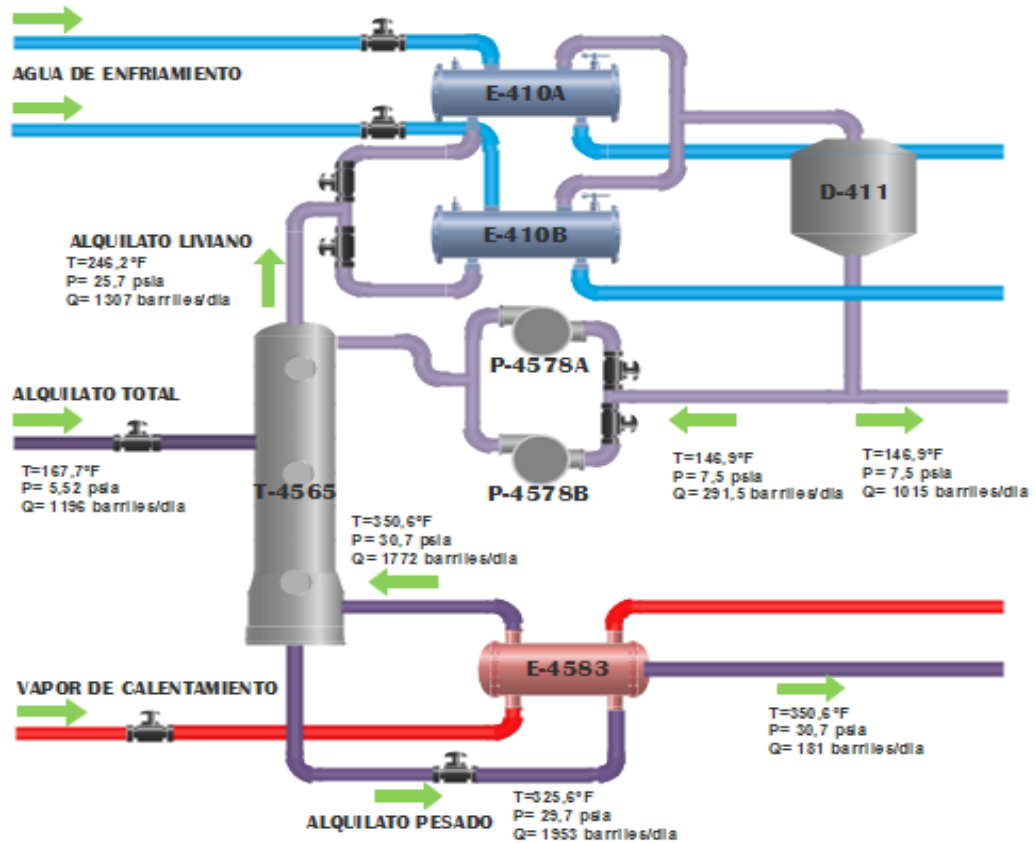
En el caso de la presión de vapor reid (RVP) no ocurre lo mismo; en el alquilato total; presenta valores con alta desviación, aunque en general presentó un error cuadrático medio bajo. Dicha desviación no generó errores en la simulación, ya que no hace parte de los datos de entrada de Aspen Hysys, y solo se utiliza para comparar los datos del RVP.

5.2 MONTAJE SIMULACIÓN HYSYS

El diagrama PFD para la torre de destilación T-4565 se presenta en la figura 6. Este proceso comprende, una torre de destilación a la cual ingresa una corriente de entrada (Alquilato Total), y tiene dos corrientes de salida, Alquilato Liviano (cima), y Alquilato Pesado (fondo).

Para caracterizar la corriente de Alquilato de entrada se ingresaron los datos de la curva de destilación TBP de la misma. El condensador presenta condensación total. Las condiciones de diseño que permanecen constantes se presentan en el Anexo B, mientras que las condiciones de operación para cada una de las simulaciones se presentaron en la tabla 2.

Figura 6 Montaje torre rectificadora de Alquilate T-4565



5.3 SIMULACIÓN DE LA TORRE T-4565

5.3.1 Resultados de las curvas TBP para las corrientes de entrada y salida.

La figura 7 y la figura 8 muestran las líneas de tendencia de datos experimentales para las corrientes de alquilate total (entrada) y alquilate liviano (producto de salida) suministrados por el laboratorio, junto con los datos obtenidos por simulación para los mismos productos.

Figura 7 Curvas de destilación TBP para el alquilato total para los datos experimentales y los obtenidos por simulación.

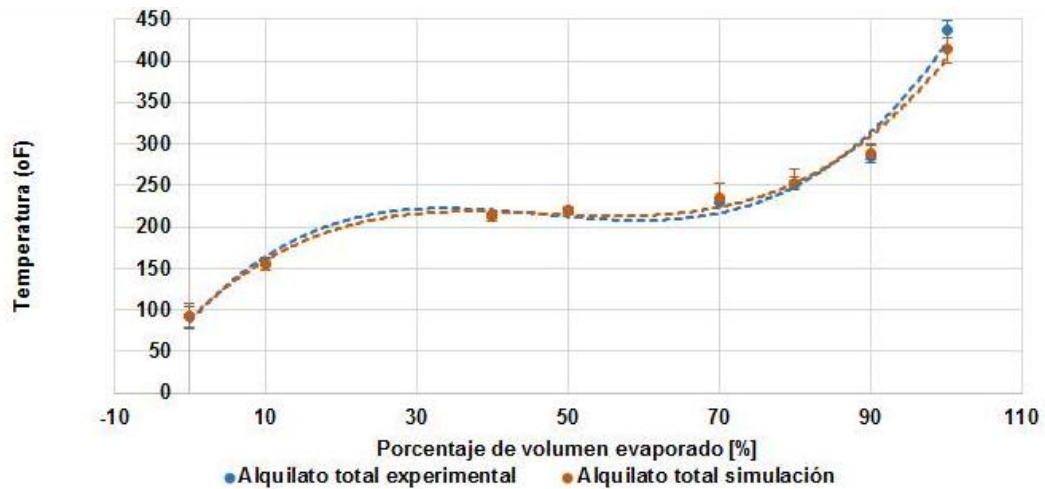
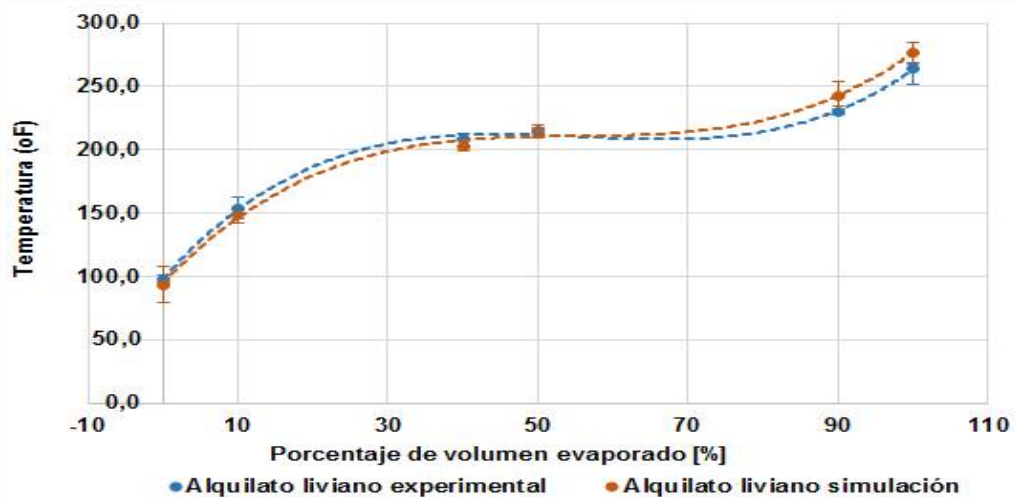


Figura 8 Curvas de destilación TBP para el alquilato liviano para los datos experimentales y los obtenidos por simulación



Como puede observarse en las figuras 6 y 7, los datos obtenidos a nivel experimental coinciden prácticamente con los simulados para ambas corrientes, en cada uno de los puntos analizados, logrando de esta manera comprobar que la simulación determina de manera adecuada las curvas de destilación TBP.

Existe una buena correlación entre los datos experimentales y simulados, lo cual concuerda con el valor del coeficiente de determinación ($R^2=0.98$) obtenido. Dicho coeficiente se calculó usando como base el promedio de cada uno de los cortes del alquilato liviano, tanto para los resultados experimentales, como para los resultados de la simulación, obteniendo como resultado un coeficiente de determinación igual a 0.98, lo que indica que la simulación presenta una buena capacidad de predicción. Los cálculos realizados para obtener este coeficiente se encuentran en el Anexo D.

Se calculó el error relativo porcentual de los cortes de destilación TBP para el alquilato liviano teniendo como base el promedio de cada uno de estos, tanto a nivel experimental como simulado. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.

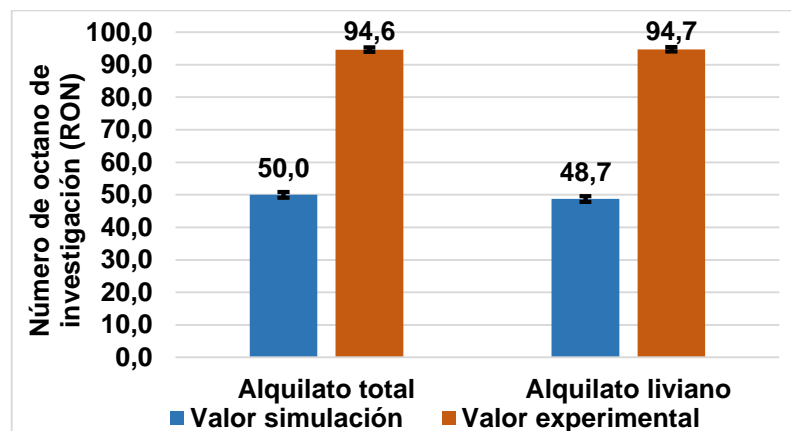
Debido a que el error relativo porcentual que presentan los parámetros se encuentra entre 5% y 10%, estos resultados se consideran aceptables. Los demás valores se encuentran por debajo del 5% lo que se considera como un valor bueno (Santo & Lucumberry, 2005).

Tabla 4 Error relativo porcentual de la simulación

PARAMETRO	$e_r, \%$
PTO INICIAL DE EBULLICION	4,51%
10%vol EVAPORADO	4,65%
40%vol EVAPORADO	3,30%
50%vol EVAPORADO	0,56%
90%vol EVAPORADO	5,82%
PTO FINAL DE EBULLICION	4,41%

5.3.2 Resultados número de octano de investigación (RON). Los parámetros necesarios para verificar la calidad del alquilato liviano que se tuvieron en cuenta para este estudio fueron el RON, RVP y curvas TBP. El número de octano de investigación RON es una propiedad que calcula automáticamente el simulador a partir de la información ingresada a la herramienta Oil Manager. Los resultados obtenidos para los datos simulados del RON fueron comparados con los resultados experimentales y los mismos se presentan en la figura 9.

Figura 9 Número de octano de investigación (RON) para las corrientes de alquilato total y alquilato liviano



A partir de la figura 9, se pudo determinar que el simulador Aspen Hysys no determina de manera adecuada esta propiedad para ninguna de las corrientes involucradas.

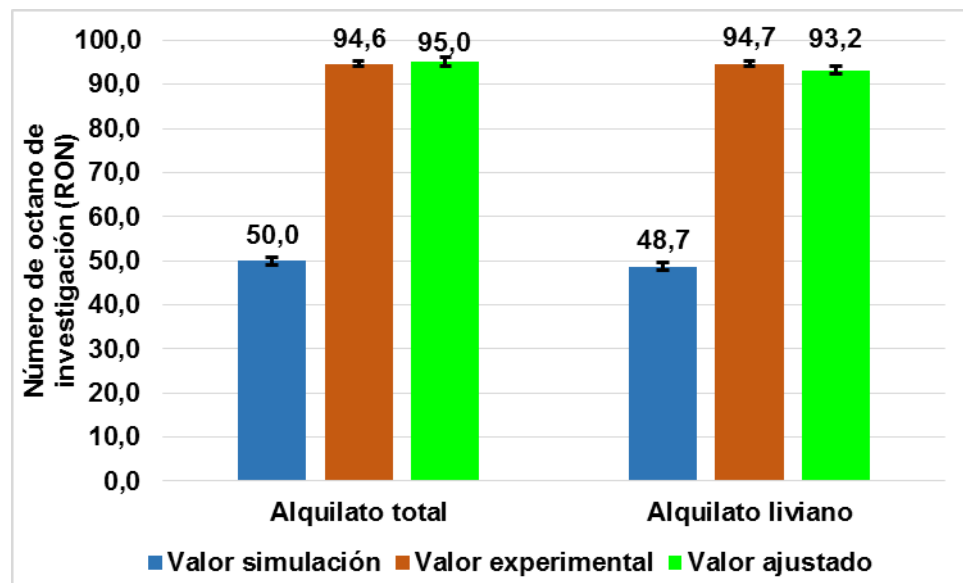
Para mejorar la predicción de esta propiedad, se realizó una simulación incluyendo la cuantificación e identificación de los compuestos que forman estas corrientes incorporando el contenido más detallado en Parafinas, Isoparafinas, Aromáticos, Naftenos y Olefinas, a través de un análisis cromatográfico denominado PIANO. En dichas pruebas se encontró que aunque el RON del alquilato total mejoró,

pasando de medir 50 a medir 59.59, dicho valor aún se encuentra lejos del valor reportado experimentalmente, el cual corresponde a 94.6.

El error existente entre los valores experimentales suministrado por parte del laboratorio de Ecopetrol S.A y los obtenidos a partir de la simulación en Aspen Hysys para el alquilato total fue de 89.2% y para el alquilato liviano fue 94.4%.

Para darle solución a este problema se calculó un factor de ajuste igual a 1.9040, con el cual se logró una buena aproximación a los datos experimentales, como se observa en la figura 10. Los cálculos realizados se presentan en el Anexo D.

Figura 10 Número de investigación (RON) para datos simulados, experimentales y ajustados

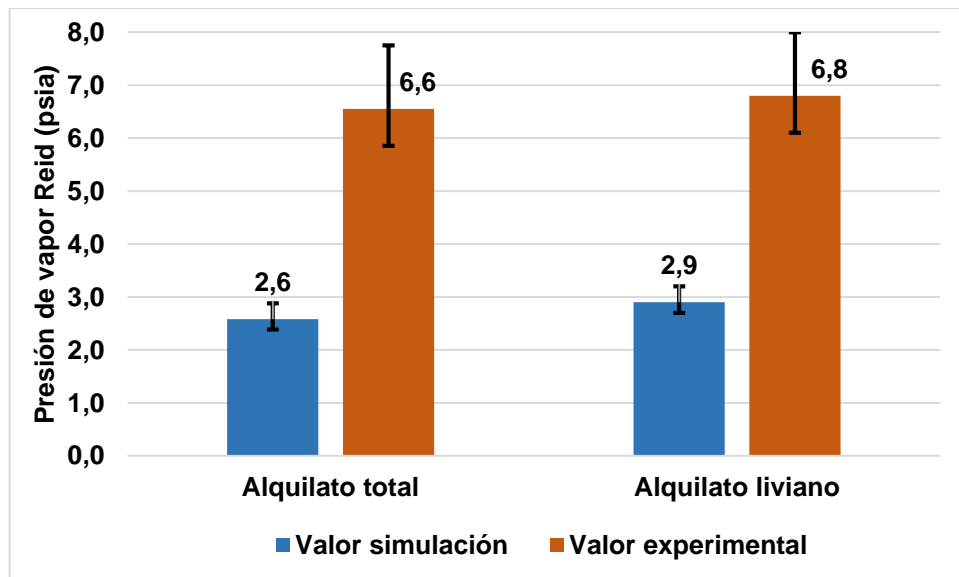


Una vez aplicado el factor de ajuste a los datos obtenidos a partir de la simulación se obtuvo un error relativo porcentual promedio de 0.74%.

5.3.3 Resultados presión de vapor reid (RVP). Al igual que sucedió con el RON, el RVP calculado por el simulador se desvía considerablemente del valor reportado por el laboratorio tanto en la corriente de entrada a la torre (Alquilato Total), como en la corriente de salida (Alquilato Liviano).

Para obtener una mejor aproximación al valor del RVP se ingresaron a la simulación los datos de composición real de una muestra de alquilato total (obtenidos mediante un análisis cromatográfico tipo PIANO) la cual tiene un RVP de 8.85, el cual en este caso es superior al valor promedio obtenido mediante la simulación (6.6), por lo que tampoco se logra predecir este parámetro de la forma adecuada.

Figura 11 Presión de vapor Reid (RVP) Alquilato

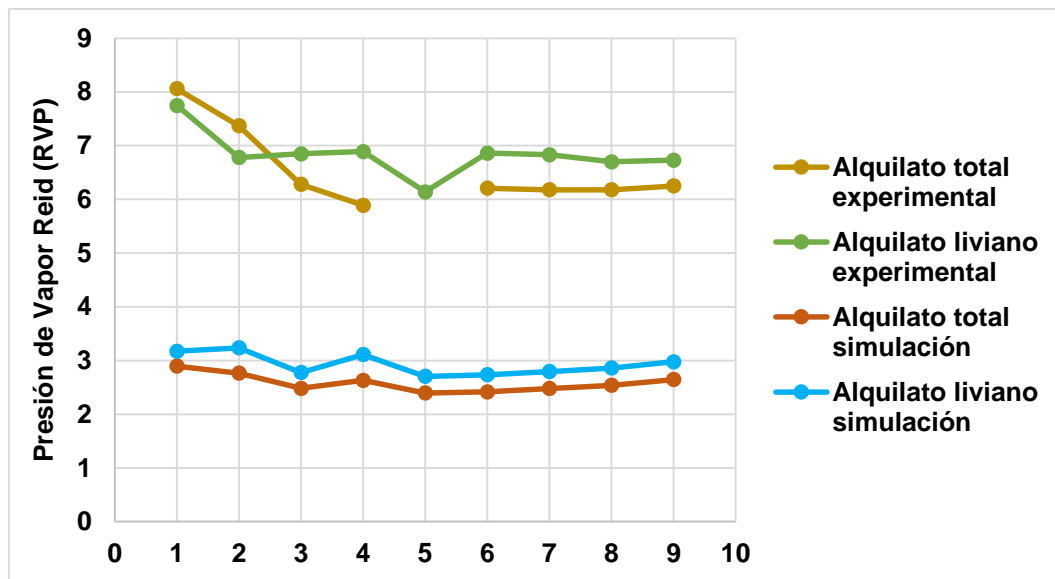


Dado que el RVP es una medida indirecta que indica la presencia de componentes livianos en la corriente, al analizar la curva de destilación (TBP) de la muestra de

alquilato liviano para la simulación hecha a partir del PIANO se encontró que las temperaturas correspondientes al corte del punto inicial y del 10% en volumen eran 10.89°F y 72.15°F, respectivamente. Por lo tanto, el PIANO analizado reporta la presencia de componentes livianos que poseen puntos de ebullición por debajo de los 80°F, valores que se encuentran por debajo del corte inicial promedio obtenido para las curvas TBP de destilación, lo que ocasionó la obtención del RVP mayor al simulado.

En conclusión, a pesar de la incorporación de los datos reales obtenidos a partir del PIANO no se logró calcular de manera adecuada el RVP, por lo que en la figura 12 se muestran los datos detallados de RVP para las diferentes muestras de ambos productos analizados (alquilato liviano y total).

Figura 12 Presión de Vapor Reid (RVP) para las diferentes muestras de alquilato total y alquilato liviano

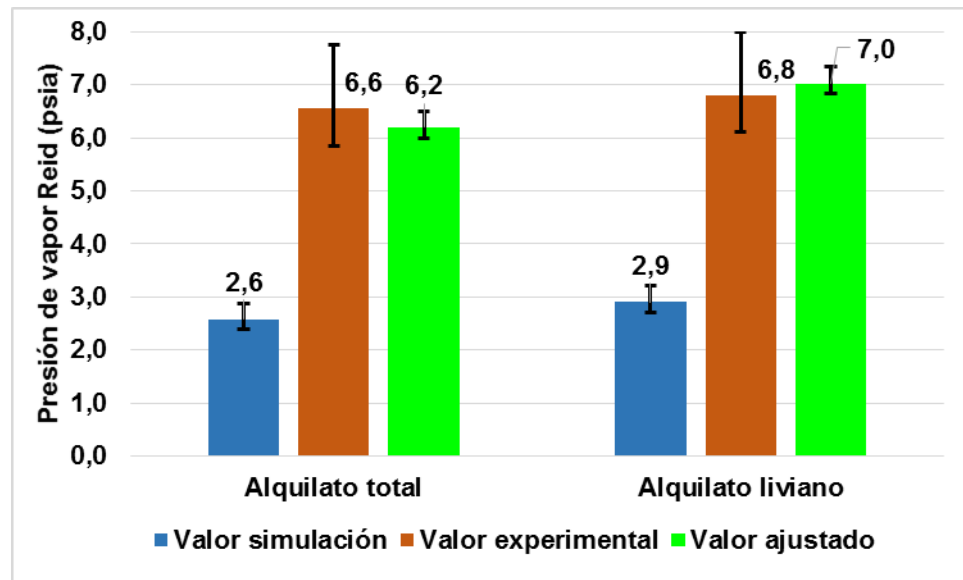


Como puede observarse, existe una correspondencia general entre el RVP del alquilato liviano y el del alquilato total tanto para los datos experimentales como para los datos simulados. Esto se debe a que al separar los compuestos pesados del alquilato total para obtener el alquilato liviano, aumenta la proporción de livianos en el alquilato liviano lo que conlleva al aumento en el RVP. Esta tendencia presenta un comportamiento atípico en las pruebas 1 y 2, posiblemente debido a posibles errores en la toma o procesamiento de la muestra.

La diferencia entre los valores experimentales suministrados por parte del laboratorio de Ecopetrol S.A., y los obtenidos a partir de la simulación en Aspen Hysys, presenta un error de 153.8% para el alquilato total y de 134.5% para el alquilato liviano.

En aras de buscar una solución a este problema se calculó un factor de ajuste igual a 2,3987, con el cual se logró un buen ajuste como se observa en la figura 13. Los cálculos realizados se presentan en el Anexo D.

Figura 13 Presión de vapor Reid (RVP) para datos simulados, experimentales y ajustados



Una vez aplicado el factor de ajuste a los datos obtenidos a partir de la simulación se obtuvo un error relativo porcentual promedio de 4.23%

5.4 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PROPIEDADES DEL ALQUILATO LIVIANO

El comportamiento que tienen las propiedades ante las perturbaciones en el sistema es un factor de gran importancia, sobre todo si dichas perturbaciones afectan los parámetros de calidad. Uno de los parámetros que tiene mayor incidencia en las características de las corrientes obtenidas es el porcentaje de corte de fraccionamiento del alquilato total en alquilato liviano y alquilato pesado.

Teniendo en cuenta los flujos de operación normales en la planta para el alquilato total y el alquilato liviano se determinó que el porcentaje de fraccionamiento normal se sitúa alrededor del 85%. Para analizar el comportamiento que tendrían

las propiedades del alquilato liviano obtenido, se varió el porcentaje de fraccionamiento desde el 95% hasta el 75%, en intervalos del 5%. Se eligió la simulación realizada con los datos de la muestra 9 de alquilato total para realizar estas variaciones.

Se determinó que los porcentajes de fraccionamiento obtenidos del 75%, 80%, 85% y 90% presentan comportamientos similares, debido a que en estos porcentajes la pendiente de la curva de destilación TBP no es tan pronunciada, como en los porcentajes finales.

Figura 14 Influencia de los distintos cortes de operación en las curvas TBP del alquilato liviano obtenido

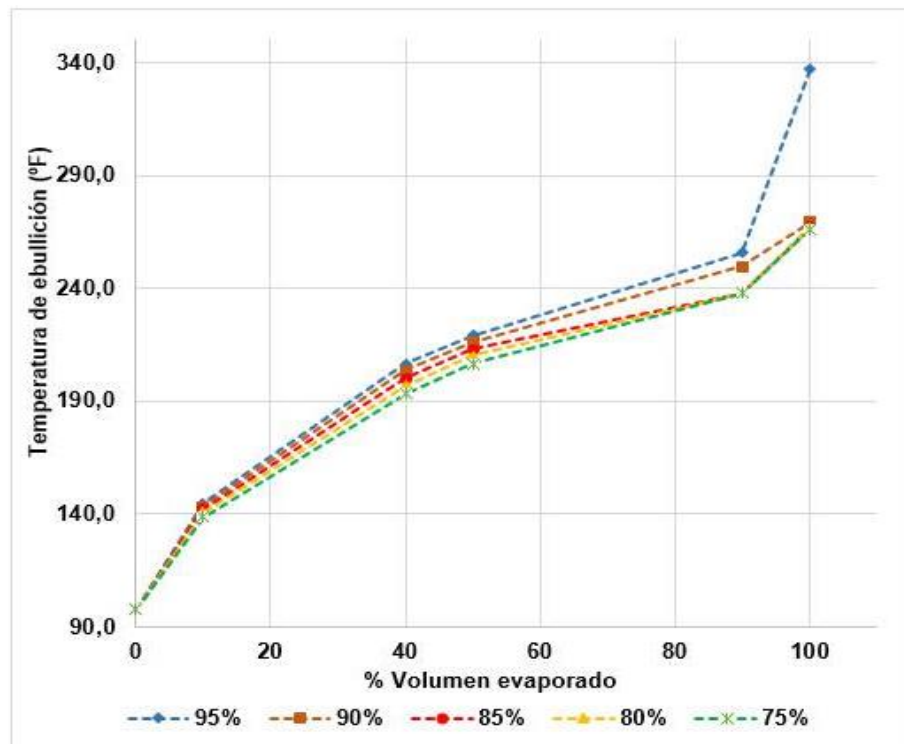
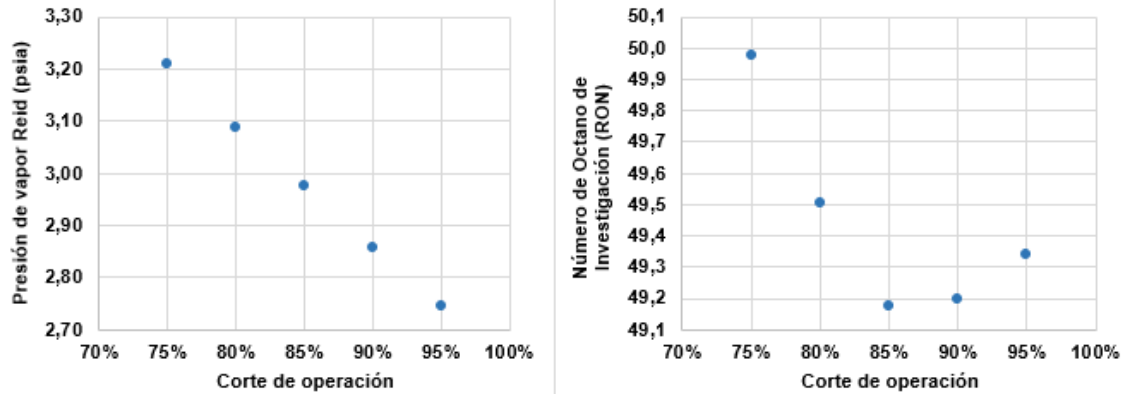


Figura 15 Comportamiento de RVP y RON vs corte de operación



De acuerdo a la figura 15, la presión de Vapor Reid (RVP) presenta un comportamiento inversamente proporcional al porcentaje de fraccionamiento, debido a que al aumentar el porcentaje de fraccionamiento, la proporción de componentes livianos disminuye en la corriente de alquilato liviano, y por lo tanto la presión necesaria para condensar esta corriente a temperatura estándar aumenta.

Por último, al analizar el número de octano de investigación en la corriente de alquilato liviano, se observa que este parámetro presenta un mínimo aunque con diferencias poco significativas a pesar de las variaciones en el corte de operación. El RON varía entre 49.2 y 50.0, por lo que la incidencia de la variación en el corte de operación en este parámetro es despreciable.

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se simuló el estado actual de operación de la torre rectificadora de alquilato T -4565 (re-run) de la refinería de Barrancabermeja, evaluándose tres de los parámetros de calidad más importantes para el producto alquilato liviano: las curvas de destilación TBP, el número octano de investigación (RON) y la presión de vapor reid (RVP). De los resultados obtenidos en este trabajo se concluye que:

- Fue posible obtener un archivo de simulación capaz de predecir de manera adecuada el parámetro de calidad denominado curva de destilación TBP para alquilato total y para alquilato liviano, el cual será utilizado en futuros trabajos de investigación en la torre de rectificación de Alquilato en la Refinería de Barrancabermeja.
- El coeficiente de determinación (R^2) obtenido para las curvas de destilación TBP fue de 0.98, permitiendo afirmar que el modelo de operación de la torre obtenido mediante la simulación en Hysys fue adecuado.
- El número de octano de investigación (RON) obtenido para las corrientes de alquilato total y alquilato liviano en la simulación no coinciden con el reportado experimentalmente presentando errores superiores al 89%. Al incorporar la información detallada de la composición de la corriente de alquilato total (PIANO) se mejora el valor del RON, aunque persiste una diferencia.
- La Presión de Vapor Reid también presenta diferencias significativas entre los resultados suministrados experimentalmente y los simulados, reportando errores de 153.8% para alquilato total y de 134.5% para alquilato liviano. Al

igual que para el RON esta propiedad mejora notablemente al incorporar los componentes obtenidos del PIANO. Por otra parte, se observó que el RVP es mayor en la corriente de alquilato liviano, que en la corriente de alquilato total, coherente con la composición típica de ambas corrientes.

- Por medio de los coeficientes de ajuste calculados se obtuvo una mejor predicción de los parámetros de calidad RON y RVP.
- Al variar los porcentajes de fraccionamiento de la torre se obtuvo que el RVP es inversamente proporcional a los porcentajes de volumen evaporado, mientras que el porcentaje de fraccionamiento no tiene una incidencia significativa en el RON.

BIBLIOGRAFÍA

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. [Cited 15 June 2015] pag. 223 – 238. Available from Internet: <http://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&ald=64185>

ASPEN TECHNOLOGY. Hysys 3.2 : Bases de simulación HYSYS [online] Aspen Tech, Hysys 3.2. [Bedford, Massachusetts E.U. Aspen Tech. [citado 3 julio 2015] Disponible en Internet: <https://procesosbio.wikispaces.com/file/view/54224008-HYSYS-3-2-Manual-Traslation.pdf>

ECOPETROL S.A, Gasolina de aviación grado 100 [PDF], Bogotá D.C: s.n. 2012.

ESPINOZA N., Ruth de las Nieves y RICCI Z, Rita. Estudio y evaluación del proceso de alquilación de la refinería El Palito. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química, 2002

FAHIM, Mohamed; ALSAHHAF, Taher y ELKILANI, Amal. Fundamentals of petroleum refining. In: Refinery Feedstocks and Products. 1 ed. Khaldeya, Kuwait. Kumait University. Department of Chemical Engineering. 2010. pag 26-27.

_____ Fundamentals of petroleum refining. In: Refinery Feedstocks and Products. 1 ed. Khaldeya, Kuwait. Kumait University. Department of Chemical Engineering. 2010. pag 263 – 268.

GAREA VÁZQUEZ, Aurora. Refino petroquímico. En: Procesos de transformación en refinería (parte 2). Cantabria, España. Facultad de Ingenierías Química y Biomolecular. 2014

GIL, Iván. Tutorial de análisis y simulación de procesos en estado estable y dinámico, [Presentación Interactiva]. Bogotá, D.C. Universidad Nacional de Colombia. 2013.

JIMÉNEZ ALFONZO, Iván de Jesús. Determinación de una guía operacional para la producción simultanea del AVIGAS/Insectol en la fraccionadora de alquilatos de alquilación 1 del CRP-CARDÓN. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Maracaibo: Universidad Rafael Urdaneta. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. 2006.

MANCILLA ESTUPIÑAN, Robinson Andrés. Refinería: Barrancabermeja – Orito. [PDF]. [Consultado 24 de Julio de 2015]. Disponible en Internet: http://odauts.com/blogsuts/indupetrolcolombia/files/2014/05/REFINE_RIAS-BARRANCABERMEJA-ORITO.pdf

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

PINTO S., José Joaquín. Proyecto de modernización refinería de Barrancabermeja. [PDF]. [Consultado 17 de Marzo de 2015]. Bogotá D.C., 2011. Disponible en <http://www.infraestructura.org.co/memoriaseventos/inversionesecopetrol2011/ecopetrol.pdf>

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

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.

TWU Chorng H. and COON John E. A generalized interaction method for the prediction of octane number for gasoline blends. Simulation Science Inc [online] 1998. [Cited 22 June 2015]. Available from Internet: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.118.6375&rep=rep1&type=pdf>

WAUQUIER, Jean Pierre. El Refino del Petróleo: Petróleo crudo, Productos petrolíferos y Esquemas de fabricación. Madrid: Díaz de Santos, 2004. p. 193-195.

ANEXOS

ANEXO A. PORCENTAJE DE UTILIZACIÓN Y DE TIEMPO MUERTO.

A continuación se presenta un resumen donde se determinó el porcentaje de utilización y el tiempo muerto de la torre rectificadora de alquilato T-4565. Para el cálculo de estos factores se hizo necesario el suministro de información concerniente a los niveles de uso de la capacidad instalada de la torre día a día durante un año, junto con el tiempo que fue usada la torre durante los últimos cinco años. Para hacer más práctica la presentación de este resumen no se presentarán los datos tabulados donde se encuentran la información del uso de la capacidad instalada y el tiempo de operación de la torre, ya que se presentan datos diarios durante cinco años.

Tabla A 1 Factor de utilización de la torre T-4565 en los últimos 5 años

Año	FACTOR DE UTILIZACIÓN
2010	70,1%
2011	61,0%
2012	59,0%
2013	51,0%
2014	67,3%
Promedio	61,7%

Tabla A 2 Tiempo muerto de la torre T-4565 en los últimos 5 años

Año	TIEMPO MUERTO
2010	61.9%
2011	56.4%
2012	70.0%
2013	55.9%
2014	59.2%
Promedio	60.7%

ANEXO B. DISEÑO DE LA TORRE DE RECTIFICACIÓN T-4564.

Para el cálculo de cada una de las simulaciones realizadas se necesitó establecer las condiciones y los parámetros de diseño necesarios para lograr que las simulaciones se acerquen lo más posible a los resultados reales. Para cumplir este propósito se presenta un resumen de los parámetros de diseño y las condiciones de operación empleadas para la simulación.

Tabla A 3 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
		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. RESULTADO DE ANÁLISIS DE MUESTRAS

Los datos de la curva de destilación TBP para las corrientes de alimentación y salida de la torre se reseñan en la Tabla A4. A partir de estos datos se genera la simulación y se comparan los datos generados con los reales que se tienen (datos de TBP de la corriente de alimentación y de salida del tope). A continuación, estos datos se exponen en las siguientes tablas.

Tabla A 4 Datos experimentales de TBP para la corriente alquilato total

		ALQUILATO TOTAL								
Unidad	Componente	1	2	3	4	5	6	7	8	9
°F	Punto Inicial de Ebullición	81,1	76,8	99,3	77,7	96,2	95,2	104,5	102,9	99,9
°C	Punto Inicial de Ebullición	27,3	24,9	37,4	25,4	36,8	35,1	40,3	39,4	37,7
°F	10% vol evaporado	154	150,1	158,4	162,7	162,1	159,1	154,8	152,4	147,4
°C	10% vol evaporado	67,8	66,6	70,2	72,6	72,3	70,6	68,2	66,9	64,1
°F	40% vol evaporado	216,9	217	213,4	215,6	214,2	212,5	211	210,2	213,4
°C	40% vol evaporado	102,7	102,8	100,8	102	101,2	100,3	99,4	99	100,8
°F	50% vol evaporado	221,9	221,9	220,3	221,7	220,5	218,7	218,8	218,5	224,1
°C	50% vol evaporado	105,5	105,5	104,6	105,4	104,7	103,7	103,8	103,6	106,7
°F	70% vol evaporado	228,5	228,2	226,9	230,3	229,9	229,3	232,9	229,1	228,6
°C	70% vol evaporado	109,2	109,0	108,3	110,1	109,9	109,6	111,6	109,5	109,2
°F	80% vol evaporado	247,2	246,4	245,7	252,0	252,8	254,0	256,3	253,9	244,3
°C	80% vol evaporado	119,6	119,1	118,7	122,2	122,7	123,4	164,6	123,3	118,0
°F	90% vol evaporado	279,9	279	278,2	285,3	286,2	287,6	297,7	287,4	276,6
°C	90% vol evaporado	137,7	137,2	136,8	140,7	141,2	142	147,6	141,9	135,9
°F	Punto Final de Ebullición	445,1	444	439,7	448	445,5	446	437,4	416,5	419,9
°C	Punto Final de Ebullición	229,5	228,9	226,5	231,1	229,7	230	225,2	213,6	215,5
psi	Presión de Vapor Reid	8,06	7,37	6,28	5,89		6,21	6,18	6,18	6,25
kPa	Presión de Vapor Reid	56	51	43	41	NR	43	43	43	43
-	Research octane number	NR	94,4	94,4	94	94,2	94,8	95,2	95,4	94,8

Tabla A 5 Datos experimentales de TBP para la corriente alquilato liviano

ALQUILATO LIVIANO EXPERIMENTAL										
Unidad	Componente	1	2	3	4	5	6	7	8	9
°F	Punto Inicial de Ebullición	95,7	95,7	100,8	96,4	98,4	95,5	97,9	98,4	97,9
°C	Punto Inicial de Ebullición	35,4	35,4	38,2	35,8	36,9	35,3	36,6	36,9	36,6
°F	10% vol evaporado	155,5	162,3	153	156,7	159,4	152,6	145,8	146	151,7
°C	10% vol evaporado	68,6	72,4	67,2	69,3	70,8	67	63,2	63,3	66,5
°F	40% vol evaporado	211,8	213,1	209,1	211,5	208	204,4	203	208,6	206,2
°C	40% vol evaporado	99,9	100,6	98,4	99,7	97,8	95,8	95	98,1	96,8
°F	50% vol evaporado	216,5	217,2	216	216,5	214,2	211,8	210,9	216,9	213,8
°C	50% vol evaporado	102,5	102,9	102,2	102,5	101,2	99,9	99,4	102,7	101
°F	90% vol evaporado	228,6	229,3	230	230,4	228,8	228	232,7	232,7	228,6
°C	90% vol evaporado	109,2	109,6	110	110,2	109,2	108,9	111,5	111,5	109,2
°F	Punto Final de Ebullición	260,4	266,2	267,1	268,3	265,6	262,9	262,9	251,2	267,1
°C	Punto Final de Ebullición	126,9	130,1	130,6	131,3	129,8	128,3	128,3	121,8	130,6
psi	Presión de Vapor Reid	7,75	6,78	6,85	6,89	6,14	6,86	6,83	6,7	6,73
kPa	Presión de Vapor Reid	53	47	47	48	42	47	47	46	46
°C	SUMA 50 + 10% (<135)	171,1	175,3	169,4	171,8	172	166,9	162,6	166	167,5
-	Research octane number	94,2	94,4	94,4	94	94,2	94,8	95,2	95,4	94,8

Las tablas presentadas previamente fueron la reunión de cada uno de los datos necesarios para cada una de las simulaciones realizadas para la correspondiente fecha, pero esta presentación de los datos no es la adecuada, ya que no indica la confiabilidad de ese resultado o incerteza, por lo cual estos resultados deben ser enunciados de la siguiente manera (Graciela, 2005).

$$\text{Resultado} = (X_m \pm \Delta X)u$$

Donde X_m es el valor medido, ΔX es la desviación estándar y u es la unidad en la cual se quiere presentar el resultado.

ANEXO D. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES Y CÁLCULOS ESTADÍSTICOS

A continuación se presenta un resumen donde se encuentran los datos obtenidos de las simulaciones realizadas para cada una de las fechas.

Tabla A 6 Resultados de las simulaciones alquilato liviano

ALQUILATO LIVIANO HYSYS										
Unidad	Componente	1	2	3	4	5	6	7	8	9
°F	Punto Inicial de Ebullición	79,76	87,28	101,8	83,43	89,34	87,77	107,4	99,87	97,65
°F	10% vol evaporado	145,2	145,8	153,6	154	153,9	152,7	150	146,3	142,1
°F	40% vol evaporado	209,2	203,1	204,8	202,8	202	202,1	201,5	198,9	200,2
°F	50% vol evaporado	219,5	215,8	215,7	214,8	212,9	212,8	213,5	209,4	213
°F	90% vol evaporado	245,8	234,7	238,7	235,4	246,4	253,7	245,6	244,4	237,9
°F	Punto Final de Ebullición	279,2	273	274,5	277,1	274,9	282,9	285,1	276,6	267,5
psi	Presión de Vapor Reid	3,173	3,235	2,776	3,11	2,707	2,734	2,795	2,861	2,976
-	Research octane number	48,26	48,07	48,19	47,59	48,52	48,93	48,99	49,5	49,17

La tabla presentada previamente fue la reunión de cada uno de los datos que resultaron de las simulaciones realizadas para la correspondiente fecha, pero esta presentación de los datos no es la adecuada, ya que no indica la confiabilidad de ese resultado o incerteza, por lo cual estos resultados deben ser enunciados de la siguiente manera (Graciela, 2005).

$$Resultado = (X_m \pm \Delta X)u$$

Donde X_m es el valor medido, ΔX es la incerteza y u es la unidad en la cual se quiere presentar el resultado. A partir de esta ecuación se presentan las siguientes tablas donde se estima la incerteza (ΔX) para las correspondientes fechas, a través de la siguiente ecuación

$$Error\ absoluto = ABS(X_m - \bar{X})$$

Donde X_m es el valor medido y \bar{X} es el promedio de los valores medidos.

$$\Delta X = Promedio(Error\ absoluto)$$

A continuación la tabla resume los errores absolutos y la incerteza

Tabla A 7 Resumen de errores absolutos e incerteza del alquiler liviano en Hysys

ALQUILATO LIVIANO HYSYS											
Unidad	Componente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	INCERTEZA
°F	Punto Inicial de Ebullición	12,9	5,4	9,1	9,3	3,4	4,9	14,7	7,2	4,9	8,0
°F	10% vol evaporado	4,1	3,5	4,3	4,7	4,6	3,4	0,7	3,0	7,2	3,9
°F	40% vol evaporado	6,5	0,3	2,1	0,0	0,7	0,6	1,2	3,9	2,5	2,0
°F	50% vol evaporado	5,3	1,7	1,5	0,6	1,3	1,4	0,7	4,7	1,1	2,0
°F	90% vol evaporado	3,2	7,8	3,8	7,1	3,9	11,2	3,1	1,9	4,6	5,2
°F	Punto Final de Ebullición	2,5	3,7	2,3	0,4	1,8	6,1	8,3	0,2	9,3	3,8
psi	Presión de Vapor Reid	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,0	0,2
-	Research octane number	0,3	0,5	0,4	1,0	0,1	0,4	0,4	0,9	0,6	0,5

Luego del cálculo de la incerteza, sea necesario estimar la desviación estándar y el error cuadrático medio, donde estos se definen de la siguiente manera.

Desviación estándar (σ):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum D_i^2}{n-1}}$$

Donde D_i es la incerteza del dato i -ésimo y n el número total de datos.

Error cuadrático medio (Δx o ε):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde σ es la desviación estándar y n el número total de datos.

Para apreciar la tabla donde se encuentra el resumen de los datos obtenidos en Hysys junto con la desviación estándar y error cuadrático medio de los datos dirigirse a la tabla 2 de Datos Simulación.

Para establecer que tal fue la capacidad predictiva de la simulación se hace necesario la determinación del parámetro R^2 o también denominado coeficiente de determinación, el cual se expresa de la siguiente manera (MENDOZA RIVERA & BAUTISTA M, 2015).

$$R^2 = 1 - \frac{\text{Varianza no explicada}}{\text{Varianza total}}$$

Donde

$$\text{Varianza no explicada} = \sum_i (y_{i \text{ Real}} - y_{i \text{ Modelo}})^2$$

$$\text{Varianza total} = \sum_i (y_{i \text{ Modelo}} - y_{\text{Promedio}})^2$$

A continuación se presenta un resumen de los datos necesarios para la determinación del coeficiente de determinación.

Tabla A 8 Resumen de datos para la determinación de R²

Unidad	Componente	TBP experimental	TBP Hysys	Desviación	Numerador	Denominador
°F	Punto Inicial de Ebullición	97,1	92,7	4,4	19,2	163,7
°F	10%vol evaporado	156,6	149,3	7,3	53,0	1918,5
°F	40%vol evaporado	209,7	202,7	6,9	47,9	9454,0
°F	50%vol evaporado	215,4	214,2	1,2	1,5	11807,3
°F	90%vol evaporado	229,2	242,5	13,3	177,6	18771,9
°F	Punto Final de Ebullición	265,1	276,8	11,7	136,4	29330,8
	Promedio	195,5		Suma	435,5	71446,2

A partir de esta información se determina que el coeficiente de determinación es de 0,98.

A continuación se presenta la tabla en la cual se resumen los cálculos realizados para la determinación del factor de corrección del RON.

Tabla A 9 Resumen de cálculos para la determinación del factor de corrección del RON

RESEARCH OCTANE NUMBER [RON]		
Datos Experimentales	Datos Hysys	Ajuste
94,4	49,6	1,9
94,4	49,9	1,9
94,0	49,3	1,9
94,2	49,9	1,9
94,8	49,8	1,9
95,2	51,0	1,9
95,4	50,8	1,9
94,8	50,3	1,9
94,2	48,3	2,0
94,4	48,1	2,0
94,4	48,2	2,0
94,0	47,6	2,0
94,2	48,5	1,9

94,8	48,9	1,9
95,2	49,0	1,9
95,4	49,5	1,9
94,8	49,2	1,9
Factor		1,90

A continuación se presenta un resumen de los cálculos realizados para la determinación del factor de corrección del RVP.

Tabla A 10 Resumen de los cálculos realizados para la estimación del factor de corrección del RVP

PRESIÓN DE VAPOR REID [RVP]		
Datos Hysys	Datos Experimentales	Ajuste
2,48	6,28	2,53
2,63	5,89	2,24
2,42	6,21	2,57
2,48	6,18	2,49
2,54	6,18	2,44
2,65	6,25	2,36
3,17	7,75	2,44
2,78	6,85	2,47
3,11	6,89	2,22
2,71	6,14	2,27
2,73	6,86	2,51
2,79	6,83	2,44
2,86	6,70	2,34
2,98	6,73	2,26
Promedio		2,40

ANEXO E RESUMEN PIANO ALQUILATO TOTAL

A continuación se presenta un resumen del PIANO suministrado por los laboratorios de Ecopetrol S.A, donde se encuentran todos los componentes de la corriente de Alquilato total.

Tabla A 11 Resumen de los componentes reportados en el PIANO para el Alquilato Total

Componente	% Volumen	Componente	% Volumen
n-Pentano	1,09%	2M-1-buteno	0,00%
3-Mpentano	0,31%	3M-1-buteno	0,00%
234-Mpentano	15,10%	cis2-Buteno	0,00%
24-Mhexano	2,03%	tr2-Penteno	0,00%
223-Mpentano	1,53%	cis2-Penteno	0,00%
25-Mhexano	2,41%	1ci2tr4-MCC5	0,00%
22-Mhexano	0,00%	113-MCC5	0,00%
224-Mpentano	32,76%	11Mci2pentan	0,00%
2-Mpentano	0,47%	Ciclo hexano	0,01%
22-Mpentano	0,00%	M ciclo pentano	0,01%
223-Mbutano	0,11%	Ciclo pentano	0,01%
33-Mpentano	0,00%	n-Pentil-BZ	0,00%
24-Mpentano	2,77%	1-E-2-i-P-BZ	0,03%
23-Mbutano	2,86%	3EoXileno	0,03%
22-Mbutano	0,01%	1234-M-BZ	0,00%
i-Pentano	8,88%	4EoXileno	0,01%
22-Mpropano	0,13%	4EmXileno	0,15%
i-Butano	0,00%	5EmXileno	0,00%
n-C12	0,00%	2EmXileno	0,12%
n-C11	0,02%	12-E-BZ	0,02%
n-Decano	0,00%	n-BBenceno	0,01%
n-Nonano	0,00%	1M4nPropilBZ	0,03%
n-Octano	0,00%	13-E-BZ	0,06%
n-Heptano	0,00%	1M2nPropilBZ	0,02%

Continuación de la Tabla A 11

Componente	% Volumen	Componente	% Volumen
124-MBenceno	0,01%	3-Ehexano	0,00%
1M2-EBenceno	0,35%	3-Mheptano	0,02%
135-MBenceno	0,00%	34-Mhexano	0,22%
1M4-EBenceno	0,00%	3M-3Epentano	0,19%
1M3-EBenceno	0,00%	4-Mheptano	0,01%
n-P Benceno	0,00%	2-Mheptano	0,02%
Cumeno	0,35%	2M-3Epentano	0,08%
o-Xileno	0,01%	23-Mhexano	2,62%
Tolueno	12,10%	33-Mhexano	0,00%
Benceno	0,00%	3-Epentano	0,00%
3-Mnonano	0,00%	3-Mhexano	0,06%
3-Eoctano	0,00%	23-Mpentano	4,02%
36-Moctano	0,00%	2-Mhexano	0,07%
3M-5Eheptano	0,00%	n-Butano	5,52%
246-Mheptano	0,00%	n-Hexano	0,00%
234-Mhexano	0,08%	1M3nPropilBZ	0,66%
Naftaleno	0,00%	123-MBenceno	0,00%
23-Mheptano	0,01%	sec-BBenceno	0,04%
27-Moctano	0,00%		
2M-2-buteno	0,00%		
225-Mhexano	0,47%		
35-Mheptano	0,00%		
25-Moctano	0,01%		
24-Moctano	0,00%		
22-Moctano	0,01%		
236-Mheptano	0,02%		
224-Mheptano	0,08%		
34-Mheptano	0,07%		
4Mci2penteno	0,11%		
i-BBenceno	0,02%		
25-Mheptano	0,02%		
223-Mhexano	0,01%		
3-Moctano	0,00%		
3-Eheptano	0,00%		
2-Moctano	0,00%		

ANEXO F VARIACIÓN CORTES DE OPERACIÓN

La prueba a la cual se le realizaron los cambios fue la realizada el 27 de julio, la cual corresponde a la muestra 9. Después de realizar las simulaciones de las variaciones de los cortes de operación de la torre T-4565 (re-run) se obtuvieron los resultados que se presentan a continuación.

Tabla A 12 Resultados variación de cortes de operación T-4565 (re-run)

Parámetro	Unidad	Corte de operación				
		95%	90%	85%	80%	75%
Punto inicial de ebullición	°F	97,7	97,7	97,7	97,7	97,7
10% volumen evaporado	°F	144,6	143,4	142,1	140,8	138,7
40% volumen evaporado	°F	206,7	203,6	200,2	196,9	193,1
50% volumen evaporado	°F	219,1	216,1	213,0	210,0	206,7
90% volumen evaporado	°F	255,8	249,8	237,9	237,8	237,9
Punto final de ebullición	°F	337,4	269,4	267,5	266,8	266,2
Presión de vapor Reid	psia	2,74	2,86	2,98	3,09	3,21
Número de octano de investigación	-	49,3	49,2	49,2	49,5	50,0