

**SIMULACIÓN DE LA TORRE SEPARADORA DE ISOBUTANO/BUTILENO
(T-4566) DE LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN U-4560 DE LA GRB.**

KAREN JULIETH CAMARGO RUEDA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2018**

**SIMULACIÓN DE LA TORRE SEPARADORA DE ISOBUTANO/BUTILENO
(T-4566) DE LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN U-4560 DE LA GRB.**

KAREN JULIETH CAMARGO RUEDA

**Trabajo de Grado para optar por el título de
Ingeniera Química**

**Director
GIOVANNI MORALES MEDINA
Ing. Químico, Dr.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2018**

Principalmente a Dios por su infinita bondad y bendiciones.

A mis padres; Jhon y Lucy por su apoyo y amor incondicional pese a todo, son lo más importante en mi vida. Gracias por su constante sacrificio en pro de mis metas y anhelos, ustedes hacen que nunca desista de soñar.

A mis hermanas; Daniela, Laura y Ana por su compañía y complicidad siempre, gracias por hacer esta etapa un camino más colorido.

A mi abuelo y mis tíos; Bibiana, Víctor y Héctor, sin ustedes nada de esto hubiese sido posible, gracias por sus sabios consejos y acogerme como una hija más.

A Chris, Tata, Karen y Gaby por su sincera amistad y ser mis compañeros de lucha durante toda la carrera.

A Jordan, Cindy, Alepi, Aleja y Mafe por su tiempo, consejos y afecto, gracias por todas las experiencias compartidas. Sin importar la distancia; mis eternos amigos.

A Santi, por su cariño, sus palabras de aliento en momentos de desesperanza y su incomparable paciencia. Gracias por ser mi lado cuerdo y hacer de cada día uno diferente.

A los profesores de IQ, por sus conocimientos compartidos, los valoro mucho.

Al profe Giovanni por su tiempo y amable acogida en esta etapa de culminación.

A aquellas personas que hicieron parte de este capítulo de mi vida; entre esas, personas de Brasil y Ecopetrol. Gracias totales.

Por último y no menos importante, a mi ángel que desde el cielo me guía e inspira a ser una mejor versión de mi cada día, ADC. Siempre en mi corazón.

Karen Camargo Rueda

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	18
2. METODOLOGÍA	19
2.1 RECOLECCIÓN DE DATOS HISTÓRICOS	19
2.2 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL	19
2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN	20
2.4 OPTIMIZACIÓN DE RECOBRO DE ISOBUTANO EN LA CIMA DE LA TORRE T-4566.	21
3. ANALISIS Y RESULTADOS	22
3.1 DATOS HISTÓRICOS	22
3.2 CODIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN EN PRO II.....	25
3.2.1 Primer escenario.....	27
3.2.2 Segundo escenario	27
3.2.3 Tercer escenario	27
3.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	29
3.3.1. Perfil de temperatura y presión en las torres	30
3.3.2 Perfil de flujo de vapor y líquido en las torres	31
3.3.3 Perfil de composición de vapor y líquido en las torres.	32
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN.....	34
3.5 OPTIMIZACIÓN DE ISOBUTANO	38
4. CONCLUSIONES	41
5. RECOMENDACIONES	42
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43
BIBLIOGRAFÍA.....	46
ANEXOS	49

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Compuestos de los flujos carga y producto.	20
Tabla 2. Estadísticos descriptivos de algunas variables históricas.....	22
Tabla 3. Características de las torres T-2004 y T-4566.....	28
Tabla 4. Resultados de análisis estadístico de la simulación	37
Tabla 5. Muestras elegidas para la optimización.....	38
Tabla 6. Comparativo de resultados de simulación y optimización en los tres escenarios de carga.....	40

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de carga a la unidad de alquilación.....	14
Figura 2. Esquema de la sección de carga de la U-4560 en donde se encuentra la T-4566.	15
Figura 3. Reacciones en proceso de alquilación: a) Iniciación b) Alquilación. c) Polimerización. d) Craqueo. e) Formación de Ester neutral.	16
Figura 4. Gráfica del comportamiento de la producción de alquilato en el año 2017.	17
Figura 5. Esquema general de la metodología.....	19
Figura 6. Pasos para realizar la simulación en PROII.....	19
Figura 7. Histórico de flujo total en barriles por día (bpd) de GLP como carga a alquilación en el año 2017.	23
Figura 8. Histórico de flujos en barriles por día (bpd) de GLP de las FCC como carga a alquilación en el año 2017	23
Figura 9. Relación volumétrica del contenido de I/O en las corrientes de GLP de carga en el año 2017	24
Figura 10. Relación volumétrica del contenido de I/O en las corrientes de carga a la sección de Reacción.	24
Figura 11. Diagrama de procesos codificado en el simulador comercial PRO II...26	
Figura 12. Composición volumétrica (%vol) de olefinas presentes en las corrientes de carga de las FCC	27
Figura 13. Composición volumétrica (%vol) de isobutano presente en las corrientes de carga de las FCC.	28
Figura 14. Gráfica del perfil de temperatura y presión en la T-2004 por platos	30
Figura 15. Gráfica del perfil de temperatura y presión en la T-4566 por platos	31
Figura 16. Gráfica del perfil de flujo de líquido y vapor a través de los platos en la T-2004.	31
Figura 17. Gráfica del perfil de flujo de líquido y vapor a través de los platos en la T-4566	32

Figura 18. Gráfica del perfil de composición de vapor de iC4 y olefinas respecto al número de platos en la T-2004	32
Figura 19. Gráfica del perfil de composición de vapor de iC4 y olefinas respecto al número de platos en la T-4566	33
Figura 20. Gráfica del perfil de composición de líquido de iC4 y olefinas respecto al número de platos en la T-2004	33
Figura 21. Gráfica del perfil de composición de líquido de iC4 y olefinas respecto al número de platos en la T-4566	34
Figura 22. Gráfica de dispersión del flujo de cima de la T-4566 en barril por día de simulación vs histórico.	34
Figura 23. Gráfica de dispersión de % volumen de olefinas en la corriente de cima de la T-4566 simulación vs histórico.	35
Figura 24. Gráfica de dispersión de % volumen de isobutano en la corriente de cima de la T-4566 simulación vs histórico	35
Figura 25. Gráfica de dispersión del flujo de fondo de la T-4566 en barril por día de simulación vs histórico.	36
Figura 26. Gráfica de dispersión de % volumen de olefinas en la corriente de fondo de la T-4566 simulación vs histórico	36
Figura 27. Gráfica de dispersión de % volumen de isobutano en la corriente de fondo de la T-4566 simulación vs histórico	36
Figura 28. Opciones del optimizador usado en PRO II para el tercer caso.....	39

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Hojas de especificaciones de las torres y equipos	49
Anexo B. Tabla de desviación estandarizada (z)	53
Anexo C. Histórico para elegir la toma de muestra	53
Anexo D. Especificaciones de las Torres T-2004 y T-4566 como datos de entrada en las 76 muestras tomadas para la simulación y validación.	54
Anexo E. Perfiles de temperatura y presión a lo largo de las torres T-2004 y T-4566 en los escenarios 2 y 3.	64
Anexo F. Tablas de análisis Anova	66
Anexo G. Codificación de los tres casos de optimización	69
Anexo H. Resultados de los tres casos de optimización para los tres escenarios de carga	70

RESUMEN

TITULO: SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA TORRE SEPARADORA DE ISOBUTANO/BUTILENO (T-4566) DE LA UNIDAD DE ALQUILACIÓN U-4560 DE LA GRB. *

AUTOR: KAREN JULIETH CAMARGO RUEDA**

PALABRAS CLAVES: ALQUILATO, GLP, OLEFINAS, ALQUILACIÓN, FCC, RELACIÓN I/O

En los últimos años el equipo de ingeniería de procesos y demás personal encargado de la Unidad de Alquilación (U-4560) de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB) ha buscado alternativas de solución para el incremento en la calidad y producción de Alquito, debido al impacto económico que este genera a la empresa por su alto valor comercial. Entre los factores que afectan este hecho, son la caracterización del GLP de carga a la unidad proveniente de las FCC, la operación de la T-4566 y su corriente de cima dirigida a la sección de reacción. La unidad cuenta con unos estándares de diseño para cumplir la calidad óptima del alquilato, sin embargo según históricos, la relación isobutano/olefinas (I/O) en las corrientes de entrada y salida de la T-4566 estuvieron por debajo de los estándares en el 2017 al igual que la producción de alquilato. Por ende se realizó una simulación en PRO II de la sección de carga (T-2004 y T-4566) en estado estacionario, teniendo en cuenta tres escenarios diferentes de carga encontrados en los históricos. Se consideraron las condiciones de operación de los equipos en el año 2017, tomados de la base de datos de la refinería, se logró la validación de la simulación y el análisis operativo de las torres en cuestión. Adicionalmente se estudiaron escenarios óptimos para la maximización del recobro de isobutano en la T-4566, asignando como variables el reflujo y la energía generada por el rehervidor; esto generó un aumento en la relación I/O en la corriente de salida de la torre (carga a reacción) y a su vez se infiere un incremento de alquilato total producido. Se espera que este proyecto sirva como base para el estudio más detallado de la operación óptima de la U-4560 de la GRB.

* Trabajo de grado.

** Departamento de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina, Ingeniero Químico, Dr.

ABSTRACT

TITLE: SIMULATION OF THE SEPARATION TOWER OF ISO-BUTANE/BUTYLENE (T-4566) IN THE ALKYLATION UNIT U-4560 AT “GRB”. *

AUTHORS: KAREN JULIETH CAMARGO RUEDA**

KEYWORDS: Alkylate, GLP, Olefin, Alkylation, FCC, I/O Relationship.

Over the last few years, the process engineers and other team members in charge of the alkylation unit (U-4560) in “GERENCIA REFINERIA BARRANCABERMEJA” (GRB) have been looking for alternatives to increase the quality and productive rate of alkylate. These variables are that important for the company due to the economic impact about its price. There are several factors affecting this resolution like the characterization of LPG loaded to the unit coming from the FCC, T-4566 operation and its top stream redirected to the reaction section. Some quality/design standards are settled to reach the optimal alkylate production. However, regarding historical records, iso-butane/olefin (I/O) relationship on T-4566 feed/out streams were below the standards as well as alkylate production during 2017. That is why it has been made a PRO II software simulation about feeding section (T-2004 & T-4566) while in stationary state taking into account three feeding case scenarios gathered from the historical records. The simulation was made under 2017 operative conditions that were collected also from the historical records. The PRO II simulation achieved operative analysis and validation of the process. In addition to the analysis, optimal case scenarios were studied to assure the maximization in iso-butane recovery at T-4566 taking reflux and the reboiler heat power. As a result, I/O relationship at top stream flow and final alkylate produced were increased. It is expected this study to be part of the main research that would lead onto a detailed paperwork about the optimal U-4560 operation in “GRB”

* Thesis.

** Physicochemical Engineering Department. Chemical Engineering School. Advisor: Giovanni Morales Medina, Chemical Engineer, Dr.

INTRODUCCIÓN

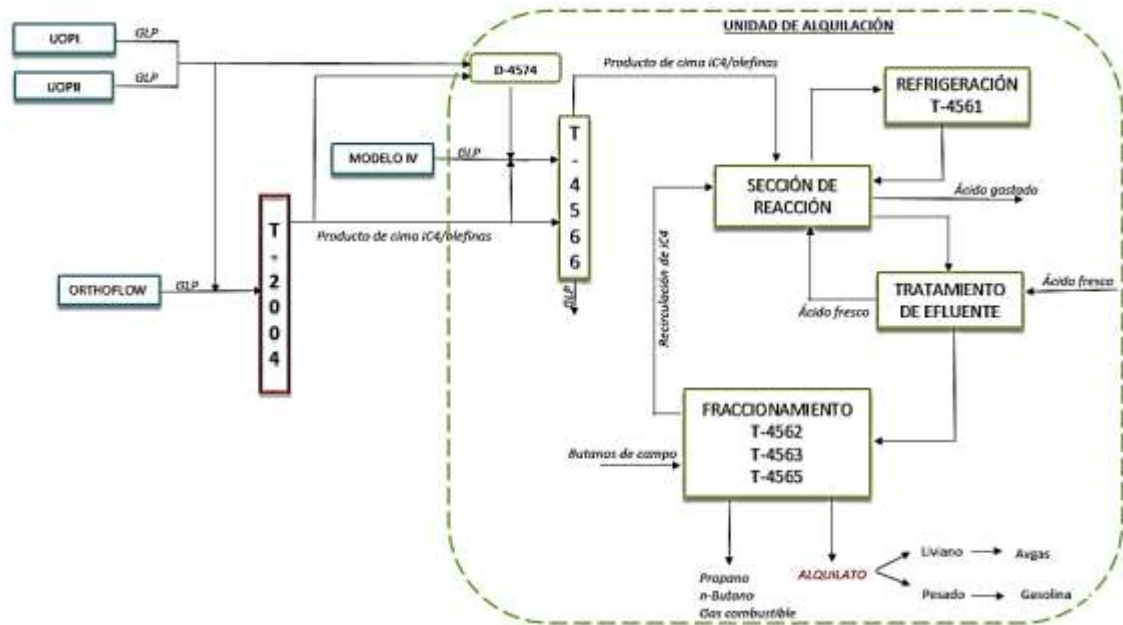
La calidad de varios combustibles derivados del petróleo depende de los tipos de hidrocarburos presentes en la mezcla. El número de octano es una de las características de los combustibles para motores de encendido por chispa, como la gasolina y el combustible para aviones [1]. Los principales problemas al usar gasolinas de bajo número de octanos son la generación de detonaciones o explosiones anticipadas en el interior de los motores debido a que resisten poco los altos niveles de compresión de un motor y además propagan una mayor cantidad de contaminantes [2].

Las exigencias internacionales para la gasolina regular establecen un mínimo de 95 en el número de octano [1]. Por lo anterior, existen diferentes tecnologías industriales para elevar el octanaje de las gasolinas, entre estas se tienen el reformado catalítico, la isomerización y alquilación; alternativamente se cuenta con aditivos para la elevación del octanaje, sin embargo, varios de estos han mostrado ser poco amigables con el medio ambiente [3]. Con la tecnología de reformado y alquilación, ECOPETROL puede cumplir con la demanda nacional de gasolinas; entre los principales mayoristas de ECOPETROL se encuentran TERPEL y BIOMAX con un 53% de compra de gasolina [4,5].

En la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB), la Unidad de Alquilación U-4560 produce iso-octanos (denominado como alquilato) a partir de la reacción entre el isobutano y las olefinas (principalmente butilenos C4=) utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4) como catalizador; también se producen propano, *n*-butano y gas combustible como subproductos [6]. La U-4560 envía el producto liviano como componente de mezcla para la obtención de combustible de aviación (Avigas), mientras que el componente pesado es utilizado para la preparación de gasolinas de alto octanaje [7].

La U-4560 cuenta con varias secciones: sección de carga, sección de reacción, sección de refrigeración y sección de fraccionamiento consecutivamente como se aprecia en la Figura 1.

Figura 1. Esquema de carga a la unidad de alquilación

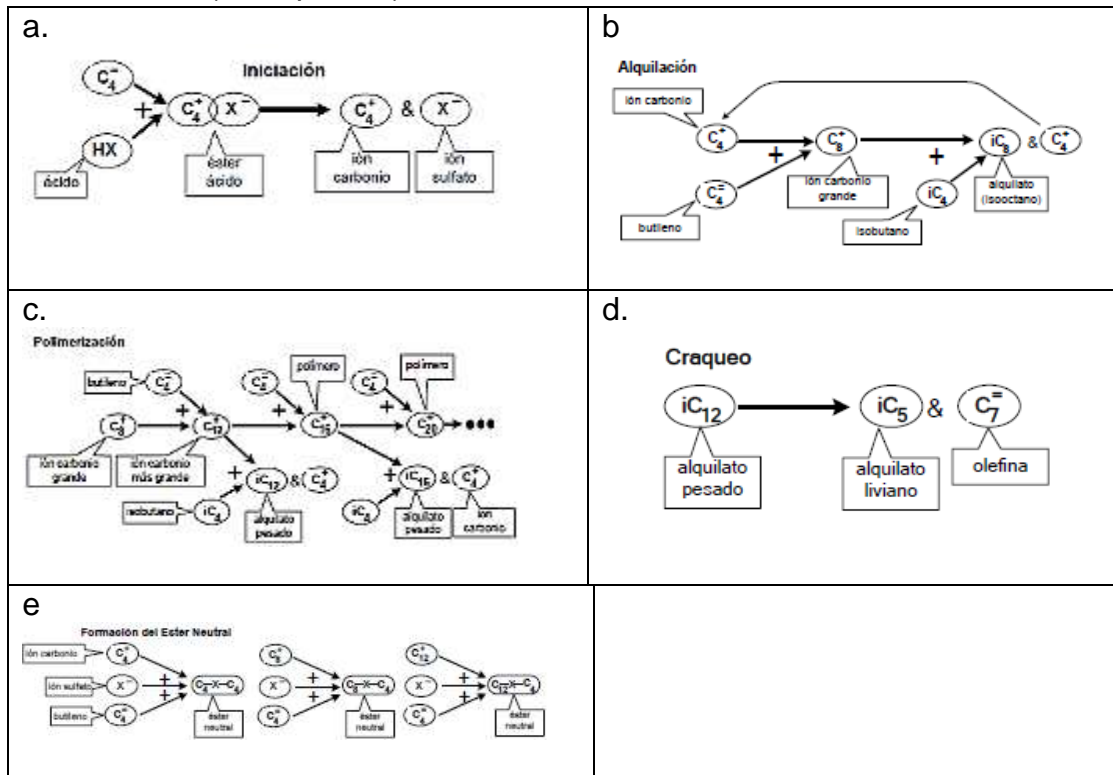


Fuente: Autor.

En la sección de carga se acondiciona un flujo de alimentación a la unidad con una relación adecuada de isobutano/olefinas (I/O) para garantizar la producción de alquilato y disminuir las reacciones secundarias e indeseadas. Esta sección cuenta con una torre de destilación de isobutano/butileno (T-4566) que genera una corriente con alta concentración en isobutano en la cima para ser enviada a la sección de reacción. [8]

Actualmente se cuenta con varios direccionamientos de las corrientes de GLP a la sección de carga, todos con el fin de abastecer la demanda del mismo en la unidad de alquilación. El GLP, producto de las unidades de craqueo catalítico (FCC), es enviado como carga a la unidad de alquilación. En Diciembre del año 2015 se estableció la facilidad de carga de GLP de las FCC a la Torre debutanizadora T-2004 de la Unidad de Topping (U-2000, planta en dónde se encuentran las unidades de destilación primaria) (ver Figura 1) para generar un GLP de mejor calidad

Figura 3. Reacciones en proceso de alquilación: a) Iniciación b) Alquilación. c) Polimerización. d) Craqueo. e) Formación de Ester neutral.



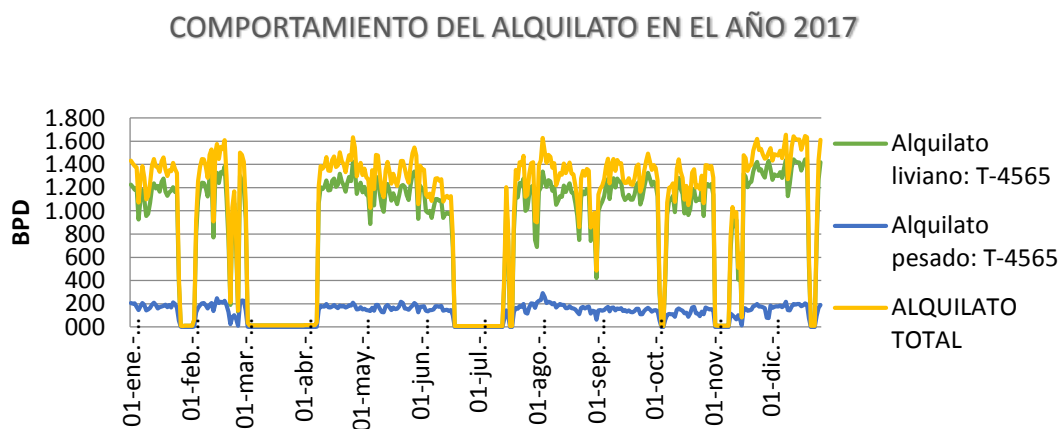
Fuente: Adaptado de [10].

La etapa de alquilación se efectúa por medio del ión carbonio, el cual reacciona con una molécula de butileno para crear una molécula iónica intermedia de 8 carbonos (Figura 3b). Este intermedio genera iso-octano por transferencia de hidrógeno desde una molécula de isobutano y un ion carbonio, este último encargado de propagar la reacción [10].

Es necesaria una alta concentración de isobutano para lograr la reacción; esto se debe a que el isobutano es poco soluble en ácido sulfúrico y las olefinas son altamente solubles. Un exceso de olefinas da paso a la formación de esteres neutrales, que pueden reaccionar con un ión sulfato (creado en la reacción de iniciación) y un ión carbonio (Figura 3e), disminuyendo el rendimiento hacia alquilato. También, el exceso de olefinas desvía el ion carbonio a la formación de polímeros [10]. Por esta razón, una relación de isobutano a olefinas (I/O) entre 7 y 10 es necesaria para suplir los requerimientos en la formación de alquilato [7].

Por otra parte, la unidad U-4560 de la GRB fue diseñada para producir 7000 barriles por día (bpd) de alquilato a partir de 10000 bpd de GLP [11], sin embargo, actualmente su carga se encuentra en 2500 bpd de GLP a partir de los cuales en el año 2017 se obtuvo una producción promedio de 1300 bpd de Alquilato total (Figura 4), con un factor de utilización de 27%.

Figura 4. Gráfica del comportamiento de la producción de alquilato en el año 2017.



Fuente: Autor.

La operación adecuada de esta unidad impacta el margen de ganancia de la refinería, debido al valor comercial del alquilato, siendo este el producto de mayor coste en una refinería. El alquilato se encuentra en un valor de 78.9 USD/barril, mientras que la gasolina no pasa 62 USD/barril (con una diferencia notoria de 16.9 USD/barril) [13]. Sorpresivamente, la U-4560 ha trabajado últimamente hasta un 40% de su capacidad de diseño [12], generando pérdidas económicas al negocio. Diferentes factores afectan la operación y eficiencia de la unidad, entre los más importantes está la operación subestándar de la torre T-4566 debido a las fluctuaciones en la carga a la unidad, las cuales dependen de los direccionamientos de las unidades FCC y la unidad de Topping; estas unidades también envían GLP a la estación de GLP para su despacho, con un valor de 1878,59 \$/GL [14]. Por otro lado, la GRB reporta una disminución en el contenido de isobutano y un aumento del contenido de butilenos en las corrientes disponibles para cargas a alquilación durante el último año, afectando el recobro de ic4 en las torres de recuperación T-

2004 y T-4566. Además, este hecho genera un mayor requerimiento de vapor hacia el rehervidor E-405 de la T-4566 y agrava los requerimientos en su sistema de bombeo de fondos [15].

Los anteriores aspectos operativos en la GRB afectan el ajuste de la relación de I/O entre 7 y 10, disminuyendo el rendimiento al alquilato e impactando el margen de refinación. El análisis operativo de la torre T-4566 por medio de la simulación en estado estacionario puede conducir a la mejora operacional que logre el ajuste en los requerimientos de la relación I/O; la simulación puede explorar escenarios que no son posibles de visualizar a nivel de planta industrial [16]. De igual forma, la optimización basada en la simulación conduce a la determinación de menores consumos energéticos o mayores concentraciones en productos.

El presente documento muestra los resultados más importantes de un análisis operativo de la sección de carga de la T-4566, (separadora de isobutano/butileno) por medio de la simulación utilizando PROII. Asimismo, se presentan diversos escenarios para la optimización de la separación de isobutano que interfiere en la producción de alquilato total de la GRB.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Codificar y validar una simulación para la torre separadora de butanos/butilenos T-4566 de la Unidad de Alquilación U-4560 de la GRB.

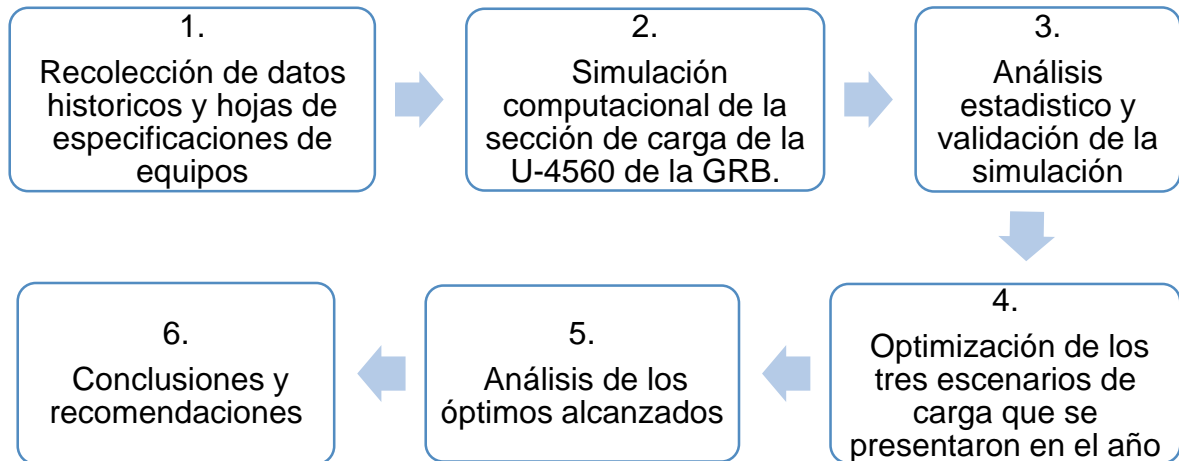
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Desarrollar un diagrama de flujo representativo de la operación de la torre separadora de isobutano/butileno T-4566 de la unidad de alquilación U-4560 en el simulador PRO II.
- Validar los resultados de la simulación codificada en PRO II utilizando datos históricos de operación del año 2017.
- Identificar en la simulación escenarios que conlleven al aumento del recobro de isobutano en la T-4566

2. METODOLOGÍA

El desarrollo del presente trabajo se llevó a cabo en seis etapas como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Esquema general de la metodología.



Fuente: Autor.

2.1 RECOLECCIÓN DE DATOS HISTÓRICOS

Los datos de proceso fueron descargados de las bases de datos SILAB y PI de ECOPETROL-GRB. Los datos históricos fueron recolectados para los sensores de las torres separadoras de butilenos T-2004 y T-4566 en su operación durante el año 2017.

2.2 SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

El software usado para la simulación fue SIMSCI PRO/II v9.4 licenciado para la GRB [17]. La codificación de la simulación en PRO II fue guiada según la Figura 6.

Figura 6. Pasos para realizar la simulación en PROII



Fuente: Autor.

Los compuestos constituyentes de la corriente de alimentación fueron definidos según resultados de pruebas por cromatografía reportadas por el laboratorio de la GRB (Tabla 1).

Tabla 1. Compuestos de los flujos carga y producto.

Compuesto	
ETANO	ISO-BUTILENO
ETILENO	CIS-2-BUTENO
PROPANO	CICLOPENTANO
PROPILENO	ISO-PENTANO
ISO-BUTANO	N-PENTANO
N-BUTANO	1,3 BUTADIENO
TRANS-2-BUTENO	C5 Y MAS PESADOS
1-BUTENO	

Fuente: Autor.

Los datos de entrada para las torres T-2004 y T-4566 requeridos por PRO II fueron tomados de las hojas de especificaciones suministradas por la GRB (anexo A). La ecuación de estado de Soave-Redlich-Kwong (SRK), fue establecida en el paquete termodinámico debido a su desempeño cuantitativo en la representación de mezclas de hidrocarburos simples [18].

2.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN

La validación de los resultados de la simulación codificada en PRO II fue efectuada por comparación con datos históricos. El tamaño muestral en los datos históricos para comparación fue definido según, [19, 20]

$$e = z \frac{p(1-p)}{n} \frac{N-n}{N-1} \quad (1)$$

Donde,

- e: es el error muestral deseado
- z: es el número de desviación estandarizada, al nivel de confianza requerido (Ver anexo B: Tabla de número de desviación estandarizada)
- p: es la proporción de población que posee la característica de interés.
- (1-p) =q: es la proporción de individuos que no poseen esa característica

- N: es el tamaño total de la población o universo total.
- n: es el tamaño de la muestra calculado

Despejando el tamaño de la muestra n:

$$n = \frac{N * z^2 * p * q}{(e^2 * (N - 1)) + z^2 * p * q} \quad (2)$$

Para el cálculo del tamaño de muestra con intervalo de confianza conocido [19] Los valores asumidos corresponden a: N=365, e= 10%, z= 1,96 (95% de confianza) p= 0.5 y q=0.5.

La ecuación 2 da como resultado un tamaño de muestra de n=76 muestras, las cuales fueron seleccionadas de forma aleatoria (Ver anexo C). La comparación de resultados de las simulaciones en las 76 muestras con los históricos fue realizada mediante el análisis ANOVA. Las variables que se utilizaron para la validación fueron los flujos y composiciones de cima y fondo de la T-4566, escogidas por ser las variables de salida, (dependientes) además de su importancia e impacto económico en la producción final del alquilato, a causa de la especificación de este flujo de entrada en la sección de reacción.

2.4 OPTIMIZACIÓN DE RECOBRO DE ISOBUTANO EN LA CIMA DE LA TORRE T-4566.

La optimización se llevó a cabo en la misma simulación de PRO II usando la herramienta *optimizer* “optimizador de diagrama de flujo” para maximizar el %volumétrico de isobutano en la cima de la torre T-4566. Las variables independientes seleccionadas fueron la relación de reflujo y el calor suministrado por el rehervidor. La optimización se efectuó considerando tres etapas. En la primera, la variable independiente fue la relación de reflujo, mientras que para la segunda etapa la variable independiente correspondió al calor de rehervidor; en la tercera etapa, las dos variables anteriores fueron habilitadas para la optimización.

3. ANALISIS Y RESULTADOS

3.1 DATOS HISTÓRICOS

Los datos históricos están formados por las variables: presión de cima de las torres, temperatura y presión de los flujos de carga, flujos y composición de carga de la ventana de operación del 2017 recolectados diariamente. La Tabla 2 presenta los estadísticos descriptivos para algunas de las variables; la lista completa de las variables se encuentra en el Anexo D.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de algunas variables históricas

Estadísticos descriptivos	T-2004				T-4566				
	PRESIÓN DE CIMA (PSIA)	FLUJO CARGA (BPD)	PRESIÓN DE CARGA (PSIA)	TEMPERATURA DE CARGA (°F)	PRESIÓN DE CIMA (PSIA)	TEMPERATURA CONDENSADOR	TEMPERATURA REHERVIDOR	FLUJO CARGA A PLATO 22 (BPD)	FLUJO CARGA PLATO 38 (BPD)
<i>Mínimo</i>	71	3096	198	119	74	81	132	278	225
<i>Máximo</i>	104	6922	259	218	88	102	150	2971	2440
<i>Promedio</i>	86	5049	211	155	85	88	142	1801	1412
<i>Desviación</i>	5,4	1046,4	16,4	22,3	2,0	3,6	2,6	562,1	684,5

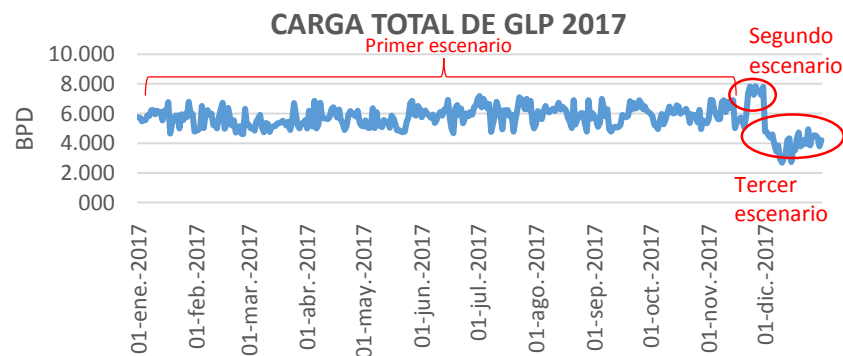
Fuente: Autor.

En las Figuras 7, 8 y 9 se presenta la variación para algunas variables en la ventana de operación seleccionada. En la Figura 7a se observa el comportamiento de los flujos de GLP disponibles en el año 2017 de las unidades de Craqueo catalítico como carga a la unidad de alquilación. Según esta figura, la operación de la unidad en el 2017 se puede dividir en tres periodos diferenciados por sus valores promedio de carga, ocasionado por fluctuaciones operacionales de las FCC. El primer periodo comprende desde el 1 de enero hasta el día 20 de noviembre y se caracteriza por una disminución de la carga ocasionada por la salida de operación de la unidad Modelo IV, según se aprecia en la Figura 8 (línea verde).

El siguiente periodo se presenta por 10 días, durante los cuales se dispone de una cantidad elevada de carga de GLP para la producción de alquilato (Figura 7); durante este periodo todas las unidades de craqueo enviaron carga, esto produjo un aumento en la producción de alquilato en este intervalo de tiempo (ver Figura 4). El último periodo presenta una disminución de la disponibilidad de GLP debido a la salida a reparación de la unidad Orthoflow (Figura 8); esta eventualidad afectó de

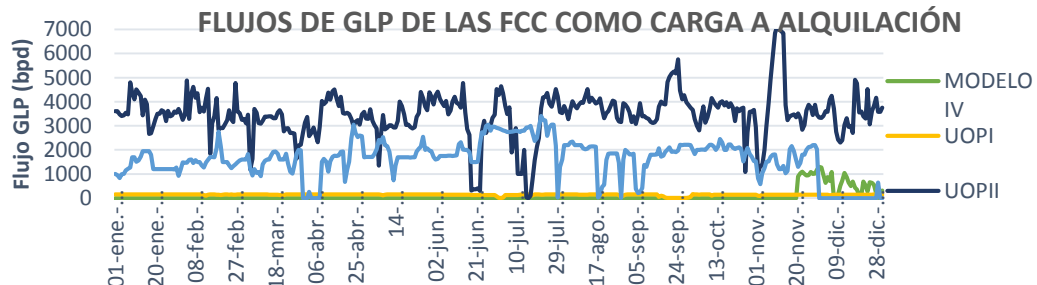
manera directa la operación de la T-2004 (ver Figura 1), la cual fue manipulada por debajo de su presión normal para mantener la composición de salida de isobutano, a pesar de la disminución del flujo de GLP, la producción de alquilato aumentó (Figura 4) debido a la mejora en la calidad de la carga; esto debido a que el GLP generado por Orthoflow se considera de menor calidad respecto a las otras FCC por la baja relación I/O que contiene; además, esta unidad no dispone de un sistema de pre-tratamiento para mitigar los contaminantes (1,3-Butadieno, H₂S y RSH) que generan un mayor consumo de ácido en la sección de reacción y a su vez disminuyen el rendimiento y la calidad del alquilato producto. La producción promedio de alquilato fue 1645 BPD en este periodo.

Figura 7. Histórico de flujo total en barriles por día (bpd) de GLP como carga a alquilación en el año 2017.



Fuente: Autor.

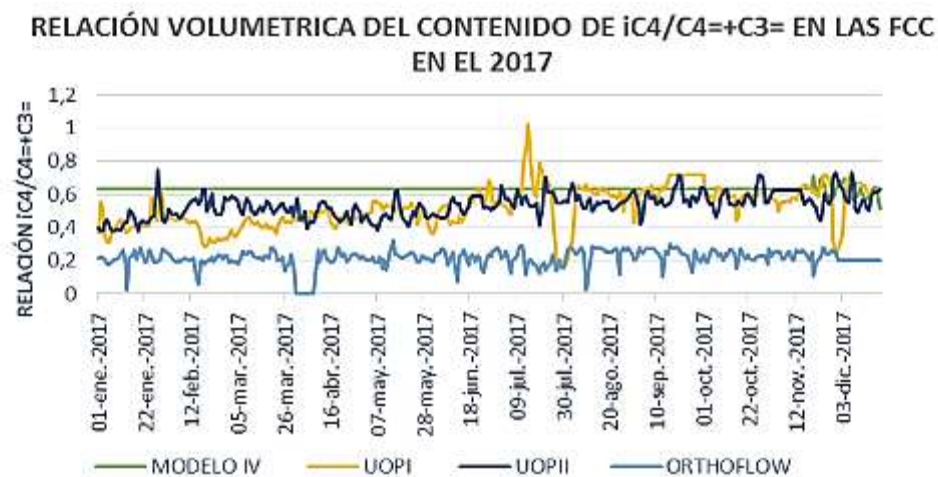
Figura 8. Histórico de flujos en barriles por día (bpd) de GLP de las FCC como carga a alquilación en el año 2017



Fuente: Autor.

Por otra parte, según diseño para la sección de alquilación, las relaciones I/O (isobutano/olefinas) especificadas corresponden a: Modelo IV 1.91, Orthoflow 1.11, UOP I 0.59 y UOP II 0.68, con lo cual se genera alquilato a razón de 4507 BPD desde los tres reactores [12]. La Figura 9 muestra que las mencionadas relaciones reportaron valores de sólo 0.63, 0.21, 0.52 y 0.53, para las respectivas unidades. Estos valores se encuentran ligados a la especificación del gasóleo de carga al proceso de craqueo catalítico y además a la eficiencia del proceso de fraccionamiento en las FCC.

Figura 9. Relación volumétrica del contenido de I/O en las corrientes de GLP de carga en el año 2017



Fuente: Autor.

También, la relación I/O de la corriente de destilado de la torre T-4566 y la que se recircula directamente de la deisobutanizadora T-4562 presentan una relación promedio de 2.5 y 12, respectivamente (Figura 10). Estos valores generan una carga a reacción con una relación I/O de 5, lo cual se encuentra por debajo del intervalo adecuado de operación (entre 7 y 10) como se explica en la introducción [7].

Figura 10. Relación volumétrica del contenido de I/O en las corrientes de carga a la sección de Reacción.



Fuente: Autor

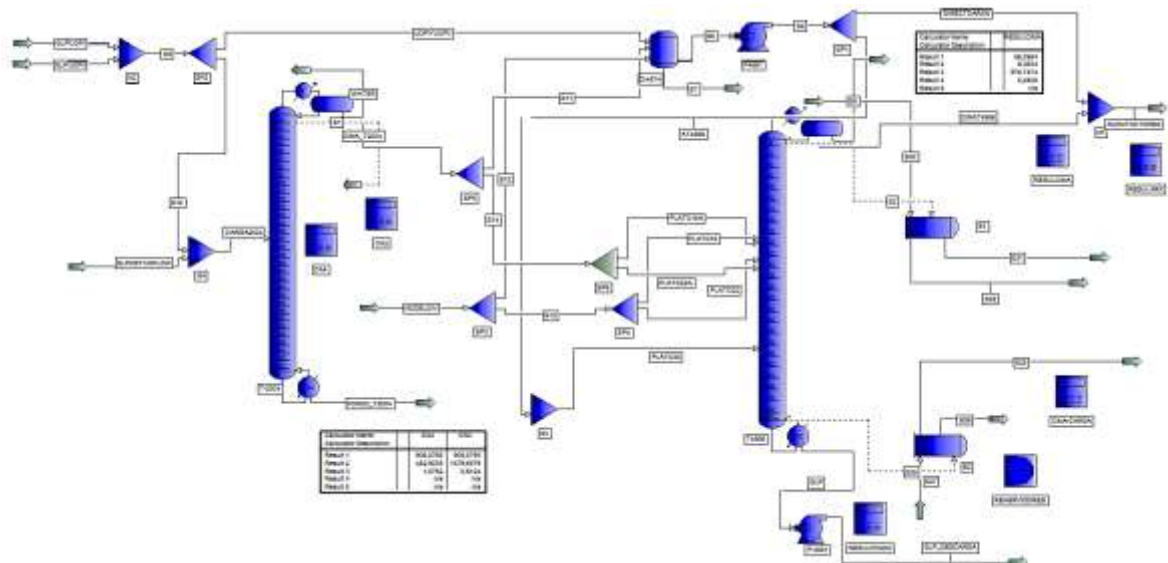
Los datos históricos presentados en esta sección muestran la operación subestandar que presentó la Unidad de Alquilación en el año 2017, debido a fluctuaciones en la carga identificadas como tres escenarios distintos relacionados con la disponibilidad de las FCC y a las especificaciones de las corrientes de GLP (relación I/O de carga a la unidad y carga directa a reacción) por debajo de los valores de diseño. Este hecho se reflejó en la eficiencia de la unidad y la producción de alquilato que disminuyó con respecto a los anteriores años. En el 2016 se presentó una producción de 2100 BPD de alquilato con un factor de utilización de 47% [15] mayor al 27% presentado en el año 2017 como se menciona en la introducción.

3.2 CODIFICACIÓN DE LA SIMULACIÓN EN PRO II.

Los tres escenarios encontrados en el análisis de los históricos fueron codificados en PRO II; cada escenario posee restricciones operacionales particulares (ver introducción y sección anterior). El diagrama de proceso base para las simulaciones de cada escenario se muestra en la Figura 10. La simulación base contiene los equipos torre T-2004, torre T-4566, bombas P-4561 y P-4581 impulsadoras de GLP en la sección de carga y fondos de la T-4566 respectivamente, intercambiadores de fondo y condensadores de cima en cada

torre, un tambor de carga antes de la T-4566, además cuenta con cuatro mezcladores y 6 divisores con caída de presión igual a cero, situados en el diagrama antes de las cargas a las torres para garantizar los direccionamientos de flujo en cada escenario. La operación en la simulación inicia con los flujos de GLP provenientes del fondo de las torres separadoras de propano/butanos de las FCC; UOPI y UOPII, que se mezclan en una sola corriente, una parte de esta entra al equipo T-2004 junto con la corriente de GLP proveniente de Orthoflow para recuperar el mayor contenido de iC4 y luego enviarlo al tambor de balance de carga de olefinas D-4574 en el que se combina con la otra parte de las corriente mezcla de UOPI y UOPII. En el tambor el producto se divide en tres fases: fase de agua que sale por el fondo, fase hidrocarburo gaseoso y fase hidrocarburo líquido. La fase hidrocarburo gaseoso se usa para regular la presión del sistema mientras que la fase líquida se envía a la T-4566 como alimento al plato 38, a su vez el flujo de GLP de la Unidad de Modelo IV alimenta esta por el plato 22. Adicionalmente, las simulaciones para cada escenario presentaron las siguientes características:

Figura 11. Diagrama de procesos codificado en el simulador comercial PRO II.



Fuente: Software PRO II.

3.2.1 Primer escenario

El flujo de entrada a la unidad fue caracterizado en el laboratorio de la GRB durante la ventana de operación; la caracterización de IC4 y olefinas puede ser analizada en las Figuras 12 y 13. En estas figuras se observan muestras con valores de las composiciones de la corriente de Orthoflow que sobrepasan el 100%; *i.e.* presenta errores de medición, por lo cual estas muestras fueron omitidas en la validación de la simulación. Las figuras G y H muestran que la corriente de Orthoflow exhibe una cantidad de olefinas superior que las corrientes generadas por las otras FCC, este contenido de olefinas, explica el bajo rendimiento en la producción de alquilato durante este escenario. (Ver Figura 4).

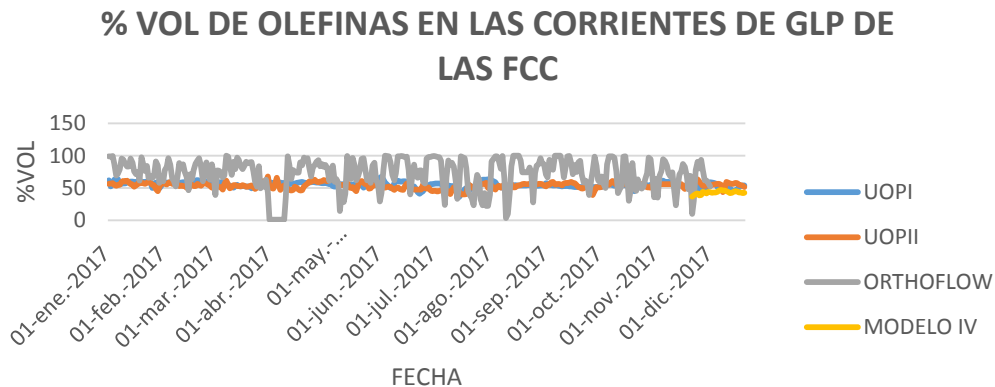
3.2.2 Segundo escenario

En este escenario se dispone de todas las corrientes provenientes de las FCC. La corriente de Modelo IV contiene una composición menor de olefinas respecto a las demás FCC (ver Figura 13); este flujo de Modelo IV ingresa al plato 22 de la T-4566, mientras que la salida de la T-2004 ingresa al plato 38 de esta misma torre. Este escenario se dio por un periodo de 10 días en los que se observó un comportamiento más estable y un incremento en la producción de alquilato (Ver Figura 4)

3.2.3 Tercer escenario

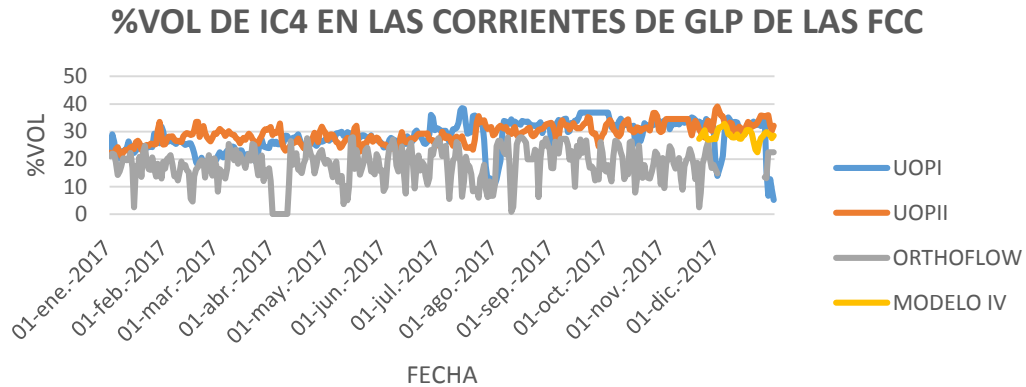
Este escenario fue igual al segundo con la diferencia que la T-2004 no recibió carga de Orthoflow, incrementando la cantidad de isobutano dirigida a la T-4566, con una producción consecuente de alquilato (ver Figura 4).

Figura 12. Composición volumétrica (%vol) de olefinas presentes en las corrientes de carga de las FCC



Fuente: Autor.

Figura 13. Composición volumétrica (%vol) de isobutano presente en las corrientes de carga de las FCC.



Fuente: Autor.

Los tres escenarios presentaron características operacionales similares. Las condiciones de operación de las torres consideran: presión de cima entre 70 y 90 psia en las dos torres, una caída de presión constante a lo largo de las columnas de 4,93 psi para la T-2004 (0,145 psi por plato) y 5 psi para la T-4566. El total de carga a la T-2004 estuvo alrededor de los 5000 BPD de GLP a presión y temperatura promedio de 211psi y 120 °F y el flujo de GLP de entrada a la T-4566 fue de aproximadamente 3000 BPD distribuidos en los dos platos de carga.

Las dos torres fueron especificadas con condensador total (Condenser type Bubble temperatura) con agua de refrigeración y rehervidor de tipo termosifón con baffles. Los divisores y mezcladores fueron adaptados a la simulación para direccionar las corrientes de carga a las torres y asegurar el flujo real de las corrientes de entrada a las mismas. Las características mecánicas tanto de las torres T-2004 y T-4566 como los condensadores y rehervidores de las mismas se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Características de las torres T-2004 y T-4566

CARACTERISTICA	T-2004	T-4566
N° de platos	34	50
Plato de alimentación	17	18-22-38

Diámetro (ft)	4.92	6
Espesor del plato (Calibre)	12	14
Espaciamiento entre platos (in)	24	24
Material	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Caída de presión en la columna (psi)	4,93	5
REHERVIDOR		
N° de tubos	788	700
Longitud de los tubos (ft)	20	16,5
Área por carcaza (ft ²)	3084	6665
Diámetro interno de la carcaza	35,7	33
Duty (MMBtu/h)	12,22	18,16
CONDENSADOR		
N° de tubos	696	1029
Longitud de los tubos (ft)	20	16
Área por carcaza (ft ²)	2370	3150
Diámetro interno de la carcaza	33,26	40
Duty (MMBtu/h)	7,65	17,28

Fuente: Tomado y modificado de los Data sheets equipos de la GRB.

También, la relación de refujo y el recobro de isobutano (flujo de IC4 de cima/ flujo de alimentación de IC4) fueron especificados en cada torre según la muestra seleccionada de los históricos durante la etapa de validación; igualmente, el cálculo de los requerimientos calóricos para los rehervidores fue habilitado para cada torre.

3.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

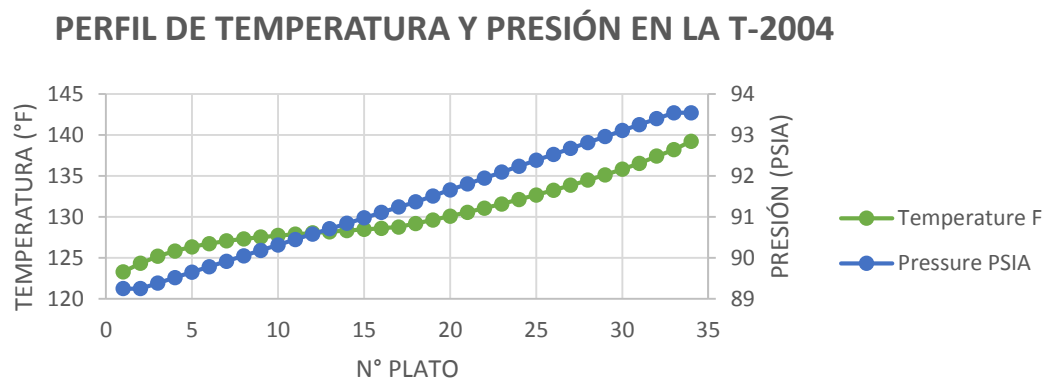
Los escenarios codificados fueron ejecutados en una muestra respectiva de cada periodo; en el anexo se presentan las condiciones operativas evaluadas para cada escenario. La ejecución de las simulaciones de los tres escenarios exhibieron convergencia (criterios: factor de incremento de error igual a 1, tolerancia punto de burbuja de 0.0001, tolerancia balance de energía 0.0001 y tolerancia para el

equilibrio 0.0001). A continuación se analizan los resultados obtenidos en las simulaciones.

3.3.1. Perfil de temperatura y presión en las torres

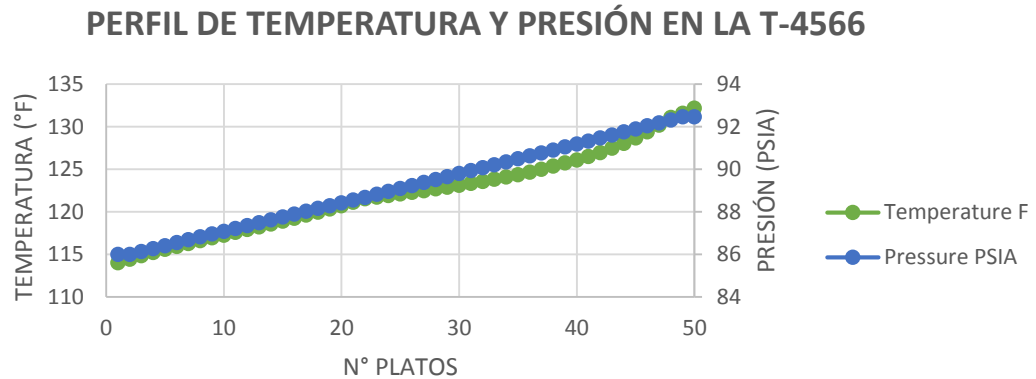
En las Figuras 14 y 15 se observa el comportamiento que tiene la presión y temperatura a través de los platos de las torres T-2004 y T-4566 respectivamente para el primer escenario, los perfiles reportados para los demás escenarios se pueden encontrar en el Anexo E. La numeración en las torres inicia desde el plato correspondiente a la cima. La simulación genera el comportamiento de $T_{\text{tope}} < T_{\text{fondo}}$ en el que la temperatura de cima corresponde al componente más volátil y la última etapa corresponde al más pesado, como en una torre real [21]. Según las Figuras 14 y 15, las caídas de presión y temperatura de las torres obtenidas en convergencia, coinciden con los datos definidos según el histórico (anexo D). Asimismo, mientras el perfil de presión es lineal, el perfil de temperatura presenta curvaturas ocasionadas por la variación en la composición de los componentes en las etapas de alimentación las torres. En la torre T-2004, entre los platos 10 y 20 se presenta una disminución en la pendiente de crecimiento de la temperatura ocasionada por el ingreso de alimentación al plato 17 a una menor temperatura (entre 120 y 130 °F) que afecta la temperatura en las primeras etapas de rectificación y agotamiento. Lo mismo ocurre para la T-4566 (Figura 15); en esta los platos que muestran alteraciones son los 22 y 38 correspondientes a la carga.

Figura 14. Gráfica del perfil de temperatura y presión en la T-2004 por platos



Fuente: Autor.

Figura 15. Gráfica del perfil de temperatura y presión en la T-4566 por platos

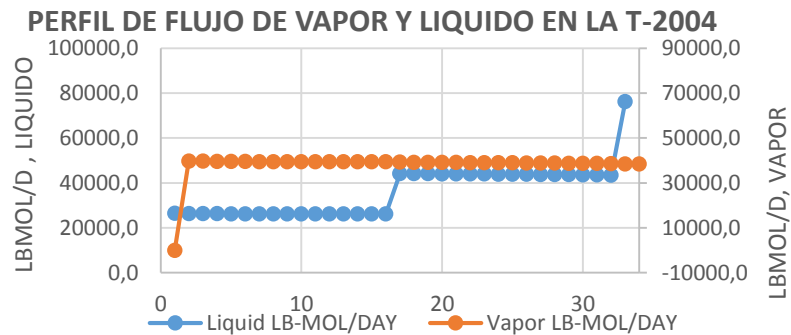


Fuente: Autor.

3.3.2 Perfil de flujo de vapor y líquido en las torres

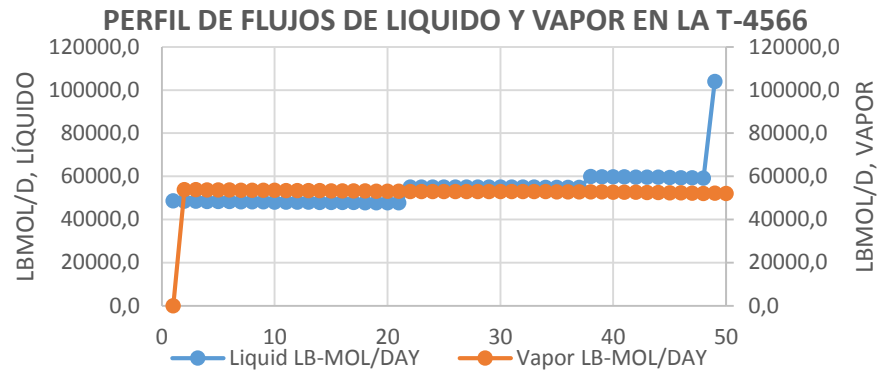
En las Figuras 16 y 17 se puede observar el comportamiento del flujo tanto de líquido como de vapor a lo largo de las columnas de separación. El flujo de vapor y líquido en las dos torres presentan zonas de valores con leves variaciones en sus tendencias. El incremento en el perfil del flujo líquido en ambas torres se debe a la entrada de alimentación, la cual ingresa en fase condensada. La T-4566 presenta dos incrementos en sus perfiles de flujo de líquido debido a que posee dos platos de carga como se mencionó anteriormente (plato 22 y 38). El perfil correspondiente al flujo de vapor demarca un flujo cero en la etapa 1 de las dos torres debido al condensador.

Figura 16. Gráfica del perfil de flujo de líquido y vapor a través de los platos en la T-2004.



Fuente: Autor.

Figura 17. Gráfica del perfil de flujo de líquido y vapor a través de los platos en la T-4566

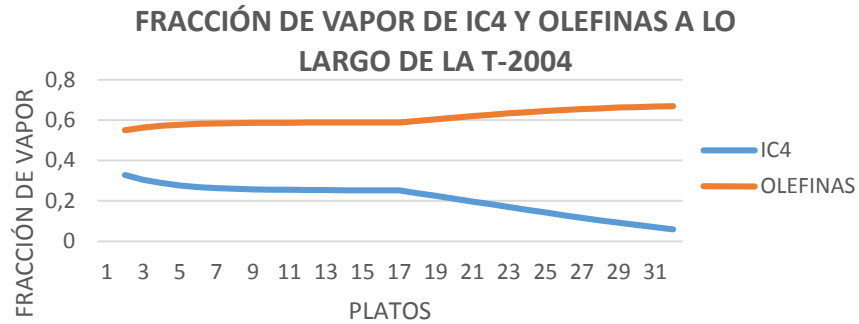


Fuente: Autor.

3.3.3 Perfil de composición de vapor y líquido en las torres.

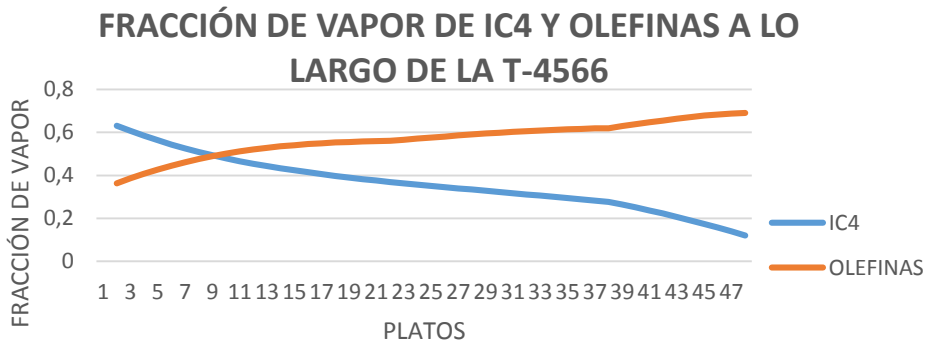
Se revisó el comportamiento de la fracción de vapor y líquido de los compuestos principales que van dirigidas al fondo de las torres; los perfiles obtenidos en las simulaciones se encuentra en concordancia con los fenómenos de enriquecimiento del líquido y empobrecimiento del vapor, respecto a olefinas, con el incremento en el número de platos; también, concuerda con lo esperado para la concentración del iC4 a lo largo de la torre. Las Figuras 18 y 19 presentan el perfil de vapor y las Figuras 20 y 21 el perfil del líquido en las dos torres respectivamente. Este comportamiento corrobora la operación de las torres en la recuperación de iC4 en la cima de las torres (plato1) y la separación de las olefinas que van dirigidas al fondo de las torres. La composición de iC4 en la cima alcanza el valor de 0,35 en la T-2004 (ver Figura 19), para la T-4566 reporta el valor de 0.64 (ver Figura 20); para el caso de las olefinas, la corriente líquida de fondos reporta el valor de 0,7 (ver gráfica 20). Los puntos de intersección en las Figuras 19 y 21 se presentan por la amplia variación de composiciones en la T-4566 tanto para iC4 como para olefinas, siendo la misma en el plato 8; esto podría estar relacionado con las características mecánicas de la torre, como su diámetro y altura (número de platos). Los perfiles de concentración presentan variaciones ocasionadas en los platos de alimentación de cada torre.

Figura 18. Gráfica del perfil de composición de vapor de iC4 y olefinas respecto al número de platos en la T-2004



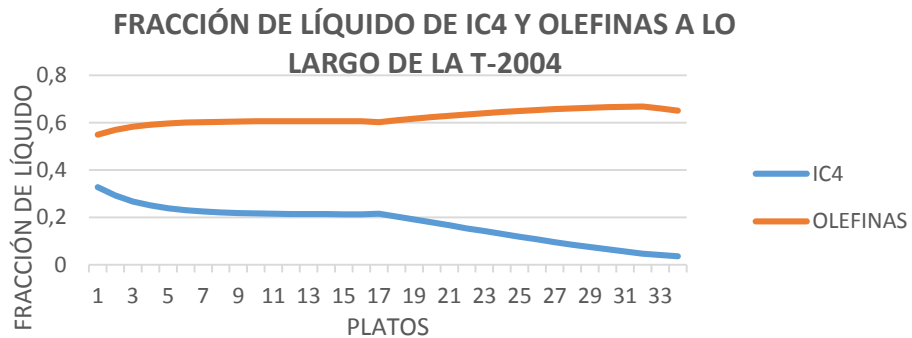
Fuente: Autor.

Figura 19. Gráfica del perfil de composición de vapor de iC4 y olefinas respecto al número de platos en la T-4566



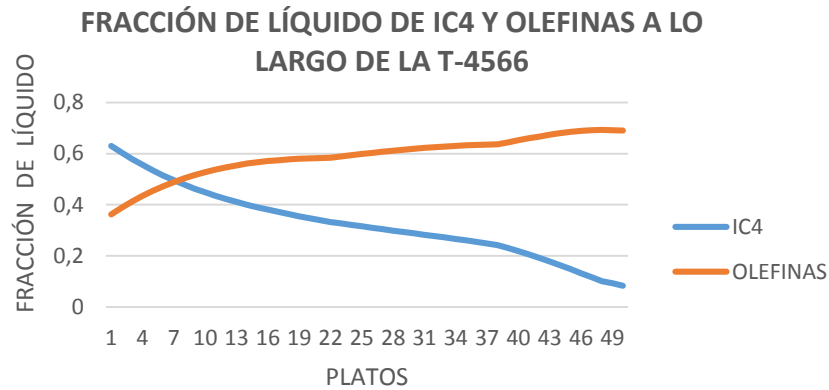
Fuente: Autor.

Figura 20. Gráfica del perfil de composición de líquido de iC4 y olefinas respecto al número de platos en la T-2004



Fuente: Autor.

Figura 21. Gráfica del perfil de composición de líquido de iC4 y olefinas respecto al número de platos en la T-4566



Fuente: Autor.

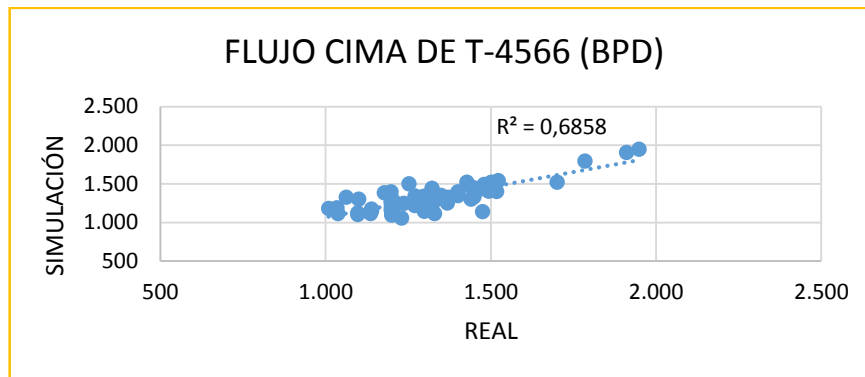
Los perfiles reportados por las simulaciones y analizados en esta sección concuerdan con las especificaciones para la torres T-2004 y T-4566; lo anterior valida cualitativamente las simulaciones de esta unidad desarrolladas en PRO II.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LA VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN

La comparación cuantitativa de los resultados de las simulaciones fue realizada por medio de análisis estadístico de prueba de hipótesis nula para las 76 muestras seleccionadas según lo descrito en la metodología. Los análisis aplicados fueron, análisis de varianza de un factor, prueba F para varianza de dos muestras y prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales, aplicadas a cada variable de salida como se explica en el índice 3.3 de la metodología.

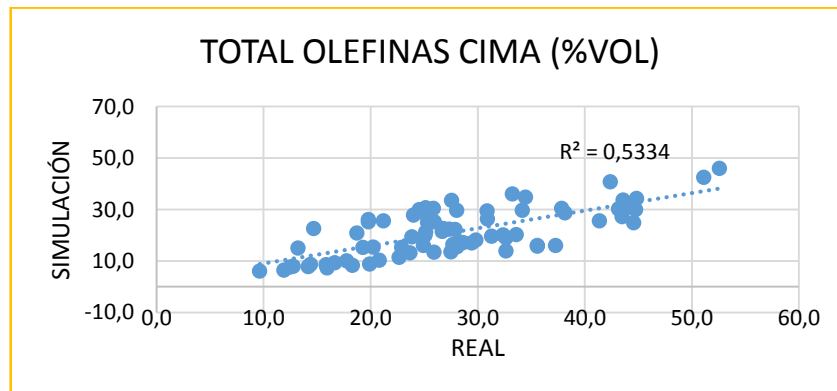
Las Figuras 22-27 presentan dispersiones para comparar los históricos versus los resultados de la simulación. Asimismo, en estas figuras se ilustran los resultados del ajuste lineal entre los históricos y las simulaciones para las respectivas variables. En los anexos se pueden encontrar las tablas completas de los análisis (anexo E).

Figura 22. Gráfica de dispersión del flujo de cima de la T-4566 en barril por día de simulación vs histórico.



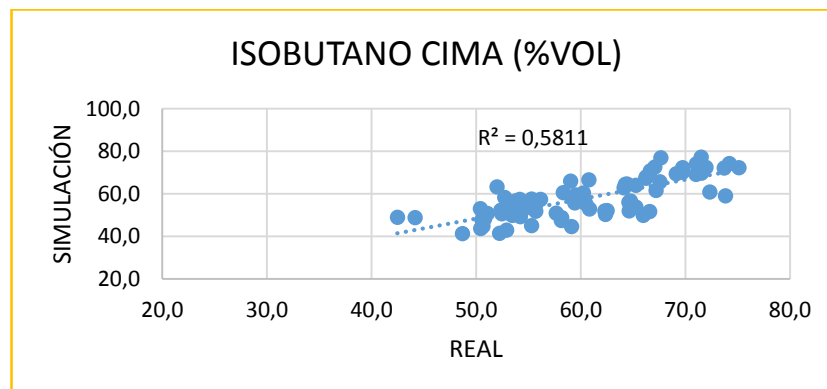
Fuente: Autor.

Figura 23. Gráfica de dispersión de % volumen de olefinas en la corriente de cima de la T-4566 simulación vs histórico.



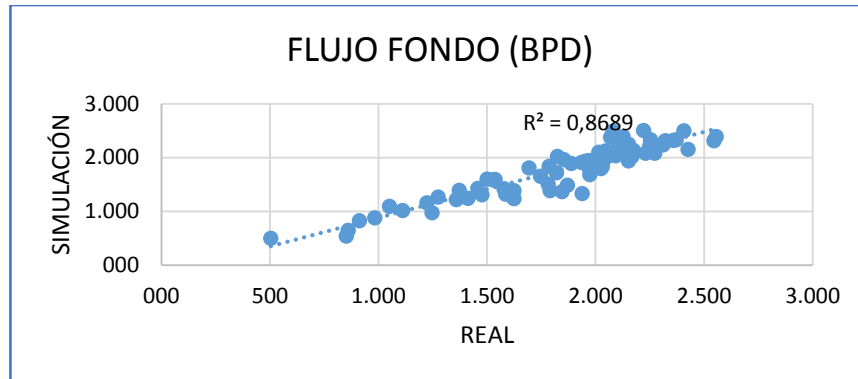
Fuente: Autor.

Figura 24. Gráfica de dispersión de % volumen de isobutano en la corriente de cima de la T-4566 simulación vs histórico



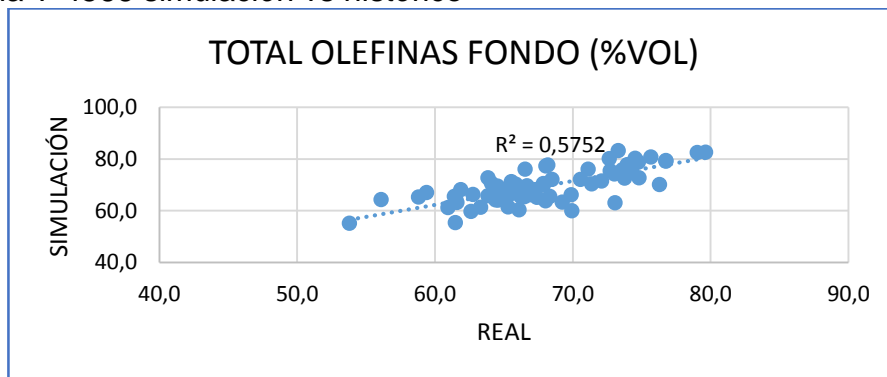
Fuente: Autor.

Figura 25. Gráfica de dispersión del flujo de fondo de la T-4566 en barril por día de simulación vs histórico.



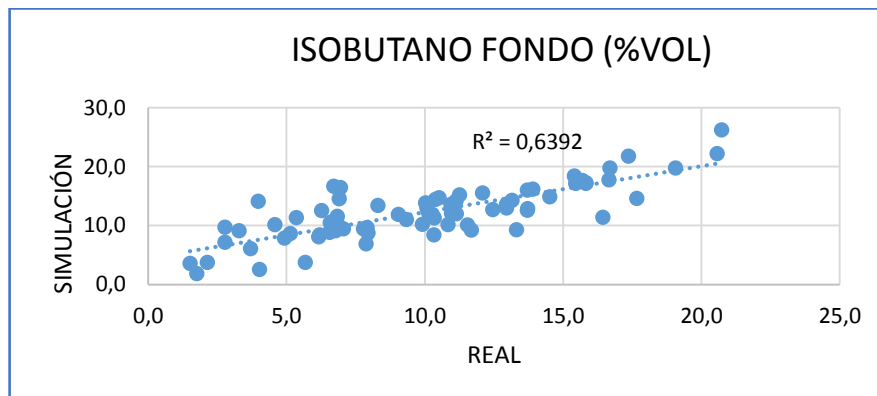
Fuente: Autor.

Figura 26. Gráfica de dispersión de % volumen de olefinas en la corriente de fondo de la T-4566 simulación vs histórico



Fuente: Autor.

Figura 27. Gráfica de dispersión de % volumen de isobutano en la corriente de fondo de la T-4566 simulación vs histórico



Fuente: Autor.

Según los coeficientes de regresión reportados en las Figuras 22-27, el mejor acercamiento ($R^2 = 0,8689$) de la simulación respecto a los históricos se presenta en la variable “flujo de fondo”, mientras la reproducción de “olefinas de cima” apenas reporta el valor de R^2 de 0,5334. Los valores de R^2 se encuentran entre 0.5 y 0.8, lo cual sugiere que en general y desde el punto de vista de una distribución normal de los residuos, la simulación codificada en PRO II reproduce los valores de los históricos. Considerando aspectos referentes a las varianzas, la Tabla 4 resume los resultados de los diferentes análisis comparativos aplicados a los resultados de las simulaciones.

Tabla 4. Resultados de análisis estadístico de la simulación

VARIABLE DE SALIDA PROII vs HISTORICO	DE UN FACTOR	PRUEBA F	PRUEBA t	% error de media
	<i>p-value</i> (probabilidad)	P(F<=f) una cola	P(T<=t) dos colas	
FLUJO CIMA T-4566	0,929	0,293	0,929	0,189
OLEFINAS CIMA T-4566	0,000	0,286	0,000	23,659
IC4 CIMA T-4566	0,058	0,062	0,058	4,424
FLUJO FONDO T-4567	0,396	0,127	0,396	3,494
OLEFINAS FONDO T-4567	0,082	0,046	0,082	2,474
IC4 FONDO T-4567	0,003	0,405	0,003	22,690

Fuente: Autor.

Considerando que la hipótesis nula (simulación e histórico pertenecen a la misma población) se acepta con valores superiores de 0.05 de probabilidad (*p-value*, Tabla 4), los análisis aplicados, en general, validan los resultados de las simulaciones en la reproducción de los datos de proceso. Las variables olefinas de la cima e IC4 de fondo tienen un porcentaje de error de 23,66 y 22,69% mayor al de las otras variables y un *p-value* <0,05 de 3,66022E-05 y 0,002598 respectivamente, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula de reproducción de los históricos por medio de la simulación. Este incumplimiento de la simulación puede explicarse debido a que los datos de la composición son medidos periódicamente y no todos los días; adicionalmente, los datos históricos pueden contener un número importante de

muestras en donde la planta se encontraba en estado dinámico, lo cual afecta la comparación de resultados con el simulador para variables de salida con constantes de tiempo apreciables; un análisis por agrupaciones o por componentes principales es recomendado para definir muestras que reflejan situaciones operacionales dinámicas. Por otro lado las demás variables aceptan la hipótesis nula, se concluye entonces que PRO II reproduce los datos históricos según las 76 mues

3.5 OPTIMIZACIÓN DE ISOBUTANO

Para la optimización del % de volumen de isobutano en la cima de la torre en los tres escenarios, se eligió una fecha en cada uno basado en la reproducción de resultados con respecto a los datos históricos; *i.e.* tres muestras de las 76 fueron seleccionadas aleatoriamente (Tabla 5).

Tabla 5. Muestras elegidas para la optimización

	PRIMER ESCENARIO		SEGUNDO ESCENARIO		TERCER ESCENARIO	
	24 DE MAYO		26 DE NOVIEMBRE		24 DE DICIEMBRE	
	HISTORICO	PRO II	HISTORICO	PRO II	HISTORICO	PRO II
FLUJO CIMA T-4566 (bpd)	1500	1510	1449	1331	1449	1351
OLEFINAS CIMA T-4566 (%vol)	34,46	34,86	18,70	21,00	24,83	28,99
IC4 CIMA T-4566 (%vol)	64,25	64,49	72,32	60,78	69,12	69,39
FLUJO FONDO T-4567 (bpd)	1952	1932	2092	2035	1844	1367
OLEFINAS FONDO T-4567 (%vol)	66,06	68,04	61,85	68,16	67,24	68,00
IC4 FONDO T-4567 (%vol)	6,56	8,89	6,27	12,55	10,97	12,09

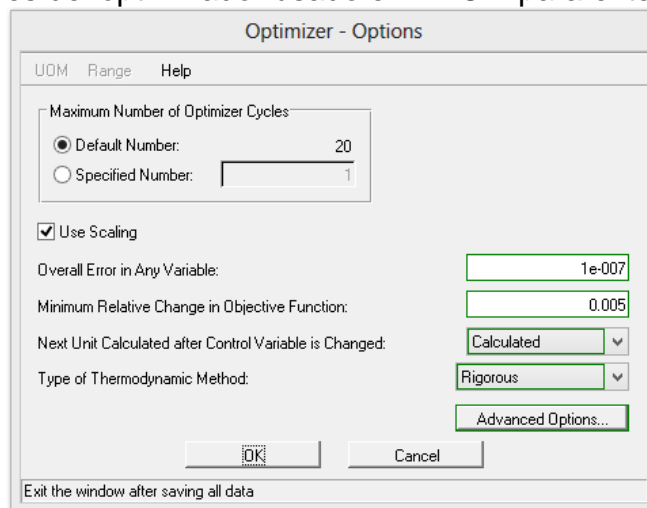
Fuente: Autor.

La herramienta “optimizer” fue agregada al ambiente de simulación para maximizar la composición de iC4 purificado en la torre T-4566. La optimización se ejecutó considerando tres casos relacionados con dos variables independientes en la T-4566, según metodología.

En el primer caso se estableció como variable la relación de reflujo de la torre, en el segundo fue el calor suministrado por el rehervidor y en el tercer caso se definieron las dos variables, tanto reflujo como calor. En todos los casos, se definieron restricciones de valor mínimo y máximo. (Ver anexo F).

El optimizador de PRO II actualmente admite el uso de modelos termodinámicos rigurosos y locales durante los pasos de perturbación. En este caso se dejó el método termodinámico riguroso, el cual es el modelo predeterminado. PROII también permite elegir el número de ciclos máximos del optimizador, así como también el error general en cualquier variable y el cambio mínimo relativo in la función objetivo [17]. El valor predeterminado para el número de ciclos de cálculo lo establece PRO II como 18 más el número de variables. Se estableció un error de 1×10^{-7} y 0,005 el cambio mínimo en la función objetivo como se observa en la Figura 28.

Figura 28. Opciones del optimizador usado en PRO II para el tercer caso.



Fuente: Software PRO II.

Los óptimos de mayor valor alcanzados en los tres escenarios se muestran en la Tabla 6; el tercer caso de optimización, en dónde se establecen las dos variables independientes, reporta los mayores valores para la función objetivo en cada escenario. Los resultados de todas las optimizaciones se encuentran en el anexo G. Los resultados del optimizador de PRO II sugieren que es posible un incremento en la función objetivo para los tres casos definidos. La composición de isobutano en la cima de la torre es maximizada con diferentes factores de incremento en los tres escenarios y la composición de olefinas disminuye, lo que genera una relación Isobutano/Olefinas mayor enviado a la sección de reacción.

Tabla 6. Comparativo de resultados de simulación y optimización en los tres escenarios de carga.

	ESCENARIO 1		ESCENARIO 2		ESCENARIO 3	
	SIM	OPTI	SIM	OPTI	SIM	OPTI
FLUJO CIMA T-4566	1510	1010	1331	1144	1351	918
ETANO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PROPANO	0,14	0,21	13,24	15,39	0,69	1,02
PROPILENO	0,04	0,06	4,51	5,25	0,68	1,00
ISO-BUTANO	64,49	79,37	60,78	65,08	69,39	84,10
1-BUTENO	11,25	5,89	6,67	4,18	9,92	4,05
N-BUTANO	0,47	0,13	0,47	0,23	0,25	0,07
ISO-BUTILENO	23,08	14,16	13,99	9,66	18,90	9,71
TRANS-2-BUTEN	0,31	0,08	0,24	0,11	0,14	0,04
CIS-2-BUTENO	0,04	0,01	0,05	0,02	0,02	0,01
C5 Y MÁS PESADOS	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1_3 BUTADIENO	0,19	0,08	0,05	0,03	0,01	0,01
OLEFINAS TOTAL	34,86	20,22	21,00	14,00	28,99	13,81
FLUJO FONDO T-4566	1932	2431	2.035	2222	1367	1800
ETANO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PROPANO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PROPILENO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ISO-BUTANO	8,89	14,13	12,55	14,37	12,09	18,37
1-BUTENO	17,34	18,31	18,15	18,47	19,85	20,46
N-BUTANO	22,69	18,27	19,07	17,63	19,85	15,23
ISO-BUTILENO	22,40	26,24	23,05	24,51	22,81	26,55
TRANS-2-BUTEN	18,49	14,85	17,90	16,48	18,41	14,07
CIS-2-BUTENO	9,34	7,44	8,69	7,98	6,88	5,24
C5 Y MÁS PESADOS	0,21	0,16	0,07	0,00	0,05	0,04
1_3 BUTADIENO	0,48	0,46	0,36	0,35	0,04	0,04
OLEFINAS TOTAL	68,04	67,30	68,16	67,79	68,00	66,36
DUTY REHERVIDOR (MM BTU/d)	17,80	20,00	17,80	20,00	17,80	20,00

Fuente: Autor.

La optimización de los escenarios 1 y 3 conduce a mayores valores de iC4; los resultados anteriores pueden guiar a la operación a la consecución de un mejor punto operativo para las características de flujos de carga en cada escenario.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente documento sugieren que la simulación codificada en PRO II para el sistema conformado por las torres T-2004 y T4566, reporta valores que representan a los datos históricos del proceso para el año 2017. La validación de la simulación fue realizada considerando 76 muestras seleccionadas aleatoriamente, lo cual incluyó situaciones en los tres escenarios operativos localizados en el análisis de datos inicial. Los resultados de las validaciones reportaron la aceptación de la hipótesis nula de igual población para los históricos y los resultados de la simulación según las variables de salida: flujo y composición de IC4 en la cima y flujo y composición de olefinas en el fondo; de otro lado, la composiciones de olefinas e isobutano, en la cima y fondo respectivamente reportaron aceptación de la hipótesis alternativa, lo cual puede deberse a los periodos de lectura intermitentes para estas variables. De igual forma, los resultados de la optimización de la concentración de iC4 de la T-4566 a partir de la simulación condujeron a mejores puntos operativos para los tres escenarios; estos puntos óptimos son sugeridos para su evaluación como posibles alternativas operativas para la torre industrial.

5. RECOMENDACIONES

Según la experiencia obtenida en la realización de este estudio, se recomienda la aplicación de las pruebas de validación en una ventana operativa mayor o en una frecuencia de muestreo mayor.

Se recomienda continuar con el estudio de la sección de carga de la unidad de alquiler para aumentar la producción de alquiler, ya que según lo aprendido en la práctica, la torre T-4566 cuenta con varias oportunidades de mejora.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DIRECCIÓN DE MOVILIDAD Y TRANSPORTE CONUEE. Derivaos del petróleo: la gasolina. Gobierno de México. Ciuda de México. p. 1-3.
- [2] McCORMICK, Robert L.. High Octane Fuels: Benefits and Challenges. National Renewable Energy Laboratory. U.S. 2016,p. 2-14.
- [3] EL OCTANAJE DE LA GASOLINA Y SU IMPORTANCIA.[Anónimo]. Venezuela: Páginas Amarillas Cantv, 2014. Rif: J-00124134-5.
- [4] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Boletín Estadístico Trimestre II 2017. Bogotá D.C. Gobierno de Colombia, 2017.p. 2-6.
- [5] RINCÓN, Hernan; GARAVITO, Aaron, Mercado Actual de la Gasolina y del ACPM en Colombia e Inflación. Colombia. 2004. p. 2-6.
- [6] ECOPETROL S.A - Vicepresidencia Refinación y Petroquímica, Gerencia refinería Barrancabermeja. Manual de Descripción del proceso de la unidad de Alquilación. Barrancabermeja: RWD Technologies, 2009. Cap. 2 pág. 12-18.
- [7] STRATCO INC. (1993) Process Design Package. Effluent Refrigerated H₂SO₄ Alkylation Proccess. Volume I
- [8] ECOPETROL S.A - Vicepresidencia Refinación y Petroquímica, Gerencia refinería Barrancabermeja. Manual de Descripción del proceso de la unidad de Alquilación. Barrancabermeja: RWD Technologies, 2009. Cap. 2 pág. 20-22

[9] ECOPETROL S.A - Vicepresidencia Refinación y Petroquímica, Gerencia refinera Barrancabermeja. Manual de Descripción del proceso de la unidad de Alquilación. Barrancabermeja: RWD Technologies, 2009. Cap. 3 pág. 13-18

[10] UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL. Facultad Regional Rosario. Cátedra de Procesos Industriales: Alquilación. Dpto de Ingeniería Química, 2015, 11p.

[11] ECOPETROL S.A - Vicepresidencia Refinación y Petroquímica, Gerencia refinera Barrancabermeja. Manual de Descripción del proceso de la unidad de Alquilación. Barrancabermeja: RWD Technologies, 2009. Cap. 4 pág. 23-28

[12] MUÑOZ ESPINOSA, Oswaldo Andrés, *et al.* Informe de corrida de verificación posterior a la parada de alquilación 2015. Barrancabermeja: Refinación y petroquímica Gerencia técnica Refinería Barrancabermeja, 2016.p.12.

[13] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA UPME. Proyección de precios de los energéticos para generación eléctrica enero 2016 – diciembre 2035. Subdirección de Hidrocarburos. Bogotá D.C. Gobierno de Colombia.2016. p. 58-70.

[14]ECOPETROL S.A. Precios vigentes: Tarifas de GLP. Estructuras de precios de GLP. [En línea].2014. (Recuperado en febrero 27 de 2018). Disponible en https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y%20%20servicios/precios/preciosvigentes/tarifas%20glp!/ut/p/z0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfljo8ziLQIMHd09Qy93S2DXQwcjUI%20Td1CjTzMvU30C7ldFQE k37y0/

[15] MUÑOZ ESPINOSA, Oswaldo Andrés, *et al.* Informe de corrida de verificación posterior a la parada de alquilación 2015. Barrancabermeja: Refinación y petroquímica Gerencia técnica Refinería Barrancabermeja, 2016.p.7-25.

[16] LIFE IS ON. SHCNEIDER ELECTRIC SOFTWARE. PRO/II Process Engineering: Comprehensive Process Simulation. 2017.p. 2-6

[17] SCHNEIDER ELECTRIC. Simsci. User Guide. PRO II 94: Improve process design & operational analysis. 2015.

[18] IGLESIAS, Omar; PANIAGUA, Carmen. Conceptos básicos de simulación de procesos en simuladores modulares. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2013.1a ed.p. 44-47.

[19] CASTILLO, J; BADI, M; GUILLEN, A. Tamaño óptimo de la muestra (Optimum sample size). México.UANL.2008.p. 59-63

[20]VALDIVIESO TABORGA, Carlos Eduardo; VALDIVIESO CASTELLÓN, Roberto; VALDIVIESO TABORGA, Oscar Álvaro. Determinación del tamaño muestral mediante el uso de árboles de decisión. Bolivia. UPB. Investigación & Desarrollo. 2011.p. 150-158.

[21] TREYBAL, Robert. Mass Transfer Operations. McGraw Hill. 1981. p. 179-378.

BIBLIOGRAFÍA

CASTILLO, J; BADII, M; GUILLEN, A. Tamaño óptimo de la muestra (Optimum sample size). México.UANL.2008.p. 59-63

DIRECCIÓN DE MOVILIDAD Y TRANSPORTE CONUEE. Derivaos del petróleo: la gasolina. Gobierno de México. Ciuda de México. p. 1-3.

ECOPETROL S.A. Precios vigentes: Tarifas de GLP. Estructuras de precios de GLP. [En línea].2014. (Recuperado en febrero 27 de 2018). Disponible en https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/productos-y%20%20servicios/precios/preciosvigentes/tarifas%20glp/!ut/p/z0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfljo8ziLQIMHd09Qy93S2DXQwcjUI%20Td1CjTzMvU30C7IdFQE k37y0/

ECOPETROL S.A - Vicepresidencia Refinación y Petroquímica, Gerencia refinería Barrancabermeja. Manual de Descripción del proceso de la unidad de Alquileración. Barrancabermeja: RWD Technologies, 2009. Cap. 2 pág. 12-18.

ECOPETROL S.A - Vicepresidencia Refinación y Petroquímica, Gerencia refinería Barrancabermeja. Manual de Descripción del proceso de la unidad de Alquileración. Barrancabermeja: RWD Technologies, 2009. Cap. 3 pág. 13-18

ECOPETROL S.A - Vicepresidencia Refinación y Petroquímica, Gerencia refinería Barrancabermeja. Manual de Descripción del proceso de la unidad de Alquileración. Barrancabermeja: RWD Technologies, 2009. Cap. 2 pág. 20-22

ECOPETROL S.A - Vicepresidencia Refinación y Petroquímica, Gerencia refinería Barrancabermeja. Manual de Descripción del proceso de la unidad de Alquileración. Barrancabermeja: RWD Technologies, 2009. Cap. 4 pág. 23-28

EL OCTANAJE DE LA GASOLINA Y SU IMPORTANCIA.[Anónimo]. Venezuela: Páginas Amarillas Cantv, 2014. Rif: J-00124134-5.

IGLESIAS, Omar; PANIAGUA, Carmen. Conceptos básicos de simulación de procesos en simuladores modulares. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2013.1a ed.p. 44-47.

LIFE IS ON. SHCNEIDER ELECTRIC SOFTWARE. PRO/II Process Engineering: Comprehensive Process Simulation. 2017.p. 2-6

McCORMICK, Robert L.. High Octane Fuels: Benefits and Challenges. National Renewable Energy Laboratory. U.S. 2016,p. 2-14.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Boletín Estadístico Trimestre II 2017. Bogotá D.C. Gobierno de Colombia, 2017.p. 2-6.

MUÑOZ ESPINOSA, Oswaldo Andrés, *et al.* Informe de corrida de verificación posterior a la parada de alquiler 2015. Barrancabermeja: Refinación y petroquímica Gerencia técnica Refinería Barrancabermeja, 2016.p.7-25.

MUÑOZ ESPINOSA, Oswaldo Andrés, *et al.* Informe de corrida de verificación posterior a la parada de alquiler 2015. Barrancabermeja: Refinación y petroquímica Gerencia técnica Refinería Barrancabermeja, 2016.p.12.

RINCÓN, Hernan; GARAVITO, Aaron, Mercado Actual de la Gasolina y del ACPM en Colombia e Inflación. Colombia. 2004. p. 2-6.

SCHNEIDER ELECTRIC. Simsci. User Guide. PRO II 94: Improve process design & operational analysis. 2015.

STRATCO INC. (1993) Process Design Package. Effluent Refrigerated H₂SO₄ Alkylation Process. Volume I

TREYBAL, Robert. Mass Transfer Operations. McGraw Hill. 1981. p. 179-378.


UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA UPME. Proyección de precios de los energéticos para generación eléctrica enero 2016 – diciembre 2035. Subdirección de Hidrocarburos. Bogotá D.C. Gobierno de Colombia. 2016. p. 58-70.

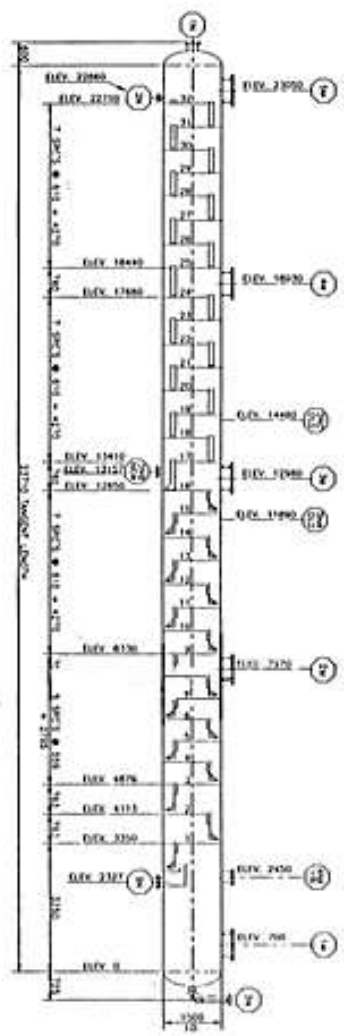
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL. Facultad Regional Rosario. Cátedra de Procesos Industriales: Alquilación. Dpto de Ingeniería Química, 2015, 11p.

VALDIVIESO TABORGA, Carlos Eduardo; VALDIVIESO CASTELLÓN, Roberto; VALDIVIESO TABORGA, Oscar Álvaro. Determinación del tamaño muestral mediante el uso de árboles de decisión. Bolivia. UPB. Investigación & Desarrollo. 2011.p. 150-158.

ANEXOS

Anexo A. Hojas de especificaciones de las torres y equipos

		PROCESS DATA SHEET TOWERS		PIT-00-F-057		
COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA		PLANT: U2000		TAG T2004		
PROJECT:	UNIT: U2000	DOC. TYPE:	PROGR:	REV:	SHEET 1 OF 2	
			DATE: 09/12/00			
1	Service				Item T.2004	
2	CONDITIONS		Temperature	Pressure		
3			°F	PSIG		
4	Operating	Shell				
5						
6	Design	Shell	610	Int. 210		
7					ext.	
8						
9						
10	Fluid					
11	Density					lb / ft³
12	Postweld Heat treatment (for process)				Yes	No
13					C.A.	(In.)
14	Shell	MATERIALS				
15		SA - 516 - Gr 60		3.0		
16						
17	Heads	Top	SA - 516 - Gr 60		3.0	
18		Botm	SA - 516 - Gr 60		3.0	
19	INTERNALS					
20	(R) (4)					
21	Lining					
22	Insulation	Yes	<input checked="" type="checkbox"/>	No	<input type="checkbox"/>	
23	Heat Conservation	Cold	<input type="checkbox"/>	Hot	<input checked="" type="checkbox"/>	
24	Fire Protection	Personnel Protection				
25	Steam Tracing	Yes	<input type="checkbox"/>	No	<input checked="" type="checkbox"/>	
26	NOZZLES					
27	Item	No.	Size In.	Mat. & Fac.	Service	
28	1N	1	10"	300# RF	HEAD VAPOR OUTLET	
29	2N	1	4"	300# RF	REFLUX INLET	
30	3NA	1	4"	300# RF	FEED INLET (1)	
31	3NB	2	4"	300# RF	FEED INLET - OLD (1)	
32	3NB	1	6"	300# RF	FEED INLET (2)	
33	3NC	1	4"	300# RF	FEED INLET - (1)	
34	4NA	1	10"	300# RF	REBOILER RETURN	
35	4NB	1	10"	300# RF	REBOILER RETURN	
36	5N	1	6"	300# RF	BOTTOM OUTLET	
37	6N	1	8"	300# RF	LIQUID TO REBOILER	
38	1CN	1	1"	300# RF	PI	
39	2CN	1	1 1/2"	300# RF	TI	
40	3CNA/D	4	1"	300# RF	LG	
41	4CNA	1	1 1/2"	300# RF	LT	
42	4CNB	1	1 1/2"	300# RF	LT	
43	5CN	1	2"	300# RF	PI (2)	
44	6CN	1	2"	300# RF	TI (2)	
45	1M	1	24"	300# RF	MANHOLE	
46	2M	1	24"	300# RF	MANHOLE	
47	3M	1	24"	300# RF	MANHOLE	
48	4M	1	24"	300# RF	MANHOLE	
49	6M	1	24"	300# RF	MANHOLE	
50	NOTES: (1) BLANKED - REVAMPING 1998					
51	(2) NEW NOZZLES - REVAMPING 1998					
52	(3) SE CAMBIARON LOS PLATOS, BAJANTES Y SECCIONES COLECTORAS NO. 15, 16, 19, 20, 21, 27 Y 31 EMPLEANDO LAMINA A310 Tp 316L GAGE 12.					
53	(4) CAMBIO DE TODOS LOS PLATOS POR OTRO DISEÑO. PLATO 1 AL 16 DE C.S. Y ANILLO DE C.S. PLATOS DEL 17 AL 32 EN SS 316 GAGE 14					
54						
55						



The diagram shows a vertical distillation tower with 32 trays. Key elevations are marked: ELEV. 2280 (top), ELEV. 2270, ELEV. 1840, ELEV. 1780, ELEV. 1340, ELEV. 1210, ELEV. 1150, ELEV. 870, ELEV. 470, ELEV. 410, ELEV. 350, ELEV. 290, ELEV. 200, ELEV. 100, and ELEV. 0 (bottom). Various nozzles and connections are labeled with circled letters (V, F, I, Y, Z, W, G, H, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, X, Y, Z).

Figura A1. Hoja de especificaciones de la Torre debutanizadora T-2004


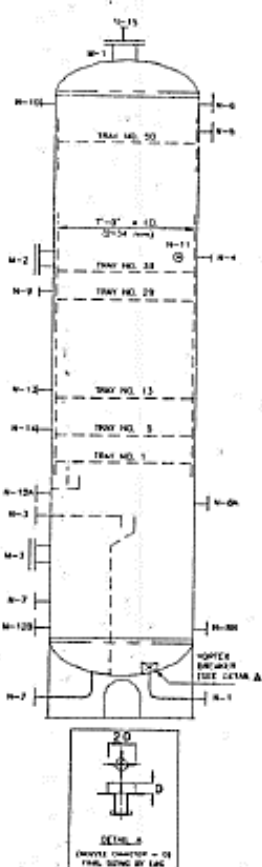
 COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA				PROCESS DATA SHEET TOWERS			
Service: Isobutane/Butylene Splitter				PLANT: STRATED Abyletion			
Item: T-401				MR			
CONDITIONS		Temperature	Pressure				
		*F	PSIG				
Operating	Shell	Top: 128	Top: 86				
		Bottom: 146	Bottom: 54				
Design	Shell	350	int. 180				
			ext.				
			int.				
			ext.				
Fluid: Butanes and Butylenes							
Density (LB/FT ³): Liquid: 33.2 J Vapor: top 1.08, bottom 1.13							
Postweld Heat treatment (For process): Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>							
MATERIALS		Corr. Allow.	Sp.				
Shell	Carbon Steel	1/8					
Heads	Top	Carbon Steel	1/8				
	Bot.	Carbon Steel	1/8				
INTERNALS							
Lining		none					
Insulation		Yes <input checked="" type="checkbox"/>	No <input type="checkbox"/>				
Heat Conservation		Cold <input type="checkbox"/>	Hot <input checked="" type="checkbox"/>				
Fire Protection		<input checked="" type="checkbox"/>	Personal Protection				
Steam Tracing		Yes <input type="checkbox"/>	No <input checked="" type="checkbox"/>				
NOZZLES							
Item	No.	Size in.	Ret. & Fac.	Service			
M-3	1	18	150 LB RF	MANWAY			
M-2	1	20	150 LB RF	MANWAY			
M-1	1	20	150 LB RF	MANWAY			
N-15	1	2	150 LB RF	VENT/VALVE			
N-14	1	1.5	150 LB RF	BLINDED			
N-13	1	1.5	150 LB RF	LOOP I & E C4 FEED			
N-12A/B	2	2	300 LB RF	REBOILER LEVEL BRIDLE			
N-11	1	1.5	150 LB RF	TEMPERATURE INDICATOR			
N-10	1	8	150 LB RF	RELIEF VALVE			
N-9	1	4	150 LB RF	BUTYLENE FEED			
N-8A/B	2	2	150 LB RF	LEVEL GAUGE BRIDLE/BLINDED			
N-7	1	1	150 LB RF	STEAMOUT			
N-6	1	10	150 LB RF	OVERHEAD VAPOR OUT			
N-5	1	8	150 LB RF	REFLUX RETURN			
N-4	1	4	150 LB RF	MODEL IV & ORTHORFLOW C ₄ FEED			
N-3	1	20	150 LB RF	REBOILER RETURN			
N-2	1	14	150 LB RF	REBOILER DRAW			
N-1	1	3	150 LB RF	NET BOTTOMS LIQUID			
DIMENSIONS ARE IN: FEET - INCHES (mm)							
NOTES:							
1. T-401 IS AN EXISTING TOWER WITH 50 REAL TRAYS.							
2. TRAY SPACING = 2 FEET.							
3. TRAY NUMBERS INDICATE REAL TRAYS.							
4. REFER TO ENCLOSED LIST OF MODIFICATIONS REQUIRED FOR THE BOTTOM OF T-401.							
							
ISSUE 5 (REVISED QUANTITY - 01) FILE NO. 2002 BY LAC							
B Final Issue		6/20/97					
A Preliminary Issue		2/14/97					
No.	Description	Date	Prd.	Chd.	App.	Rev.	Description

Figura A2. Hoja de especificaciones de la Torre Separadora isobutano-butilenos T-4566

COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA		UNIT: STRATED Alkylation	
SERVICE OF UNIT Isobutene/Butylene Splitter Condenser		Item E-419A/B	
Size 40-6-192	Type A68	Conn. and In.	Parallel X Series
Total Surface 8,300 sq. ft.	No. of Shells per Unit 2	Surface per Shell (sq. ft.)	3,150 sq. ft.
PERFORMANCE OF ONE UNIT		(No. of Units Required: 1)	
Fluid Name	Shell Side (In/Out) Splitter Overhead	Tube Side (In/Out) Cooling Water	
Total Fluid lb / h	126,028	1,075,200	
Vapor lb / h	126,028		
Liquid lb / h			
Steam lb / h			
Water lb / h		1,075,200	
Surface Tension Dyn/cm		8.0	
MW	57.0	18.0	
Capacity (lit/ft ³) of P&T lb / ft ³	1.090	33.17	
Viscosity cP	0.009	0.128	
Therm. Cond. Btu / h ft °F	0.011	0.34	
Specific Heat Btu / lb °F	0.462	0.824	
Latent Heat Btu / lb		1.03	
Operating Temperature °F	126.8	117.2	
Velocity Average ft / s		39.0	
Pressure Drop PSI Allowed	5.0	Calc. Allowed	
Initial Operating Pressure PSIG	88.2	50	
Fouling Factor h ft ² °F / Btu	0.002	0.002	
Heat Duty 17,277,000 Btu / h	MTD (corr.) °F: 24.3	% Overdesign:	
Transfer rate Btu / h ft ² °F	Service 116	Clean	
CONSTRUCTION OF ONE SHELL			
Design/TEST Pressure PSIG	Shell Side 190/205	Tube Side 75/115	
Design Temperature °F	175	150	
No. of Passes Per Shell			
Corrosion Allowance in.	1/8	1/8	
Connections	In 10" / 150 PSIG RF	10" / 150 PSIG RF	
Size in. & Rating	Out 6" / 150 PSIG RF	10" / 150 PSIG RF	
	Intermediate 10" / 150 PSIG RF	10" / 150 PSIG RF	
Insulation	None	None	
Tube No. 1,029	O.D. in. 3/4	Thk./WG	16
Length in. 16'-0"	Root. in. 1		
Shell I.D. in. 40	O.D. in.		
Baffles :Type Segmental	:Cut	% Vert.	
Spacing :General 13-3/8"	:Dist	in.	
No. of baffles	:No. of joints of Sealing Strips		
Baffle Long:	GASKETS		Float. Head Cover Carbon Steel
Impingement Plate	Shell	Baffle Carbon Steel	
(FOR THERMOSIPHONS ONLY)			
Liq. Static Head Required	Floating Head		Tube Supports
dv2 lb / ft s ²	Shell Nozzle	Bunds	Shell/Channel
In	Test Ring		Shell / Channel
Out	Test Flange		Floating Head
Intermediate	Expansion Joint		Channel Cover
T.E.M.A. Class	Code Requirements		
Weight: Empty	lb. Full of Water:	lb. Tube Bundle	lb.
NOTES: Existing heat exchanger relocated from existing alkylation unit. Normal operating duty = 14,228 MMSTU/yr.			
B Final Issue	8/20/97		
A Preliminary Issue	3/27/97		
Rev	Description	Date	Pre. Des. App.

Figura A3. Hoja de especificaciones del condensador E-419 de la torre T-4566

COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA		Unit: STRATCO Alkylation	
SERVICE OF UNIT: Isobutane/Burylene Spalter Reboiler		Item: E-408	
Size: 33-4-192	Type: AHS	Connected In:	Parallel
Total Surface: 6,565 sq.ft.	No. of Shells per Unit: 1	Surface (or Shell/Off.): 6,565 sq.ft.	
PERFORMANCE OF ONE UNIT (No. of Units Required: 1)			
Fluid Allocation: Shell Side (In/Out)		Tube Side (In/Out)	
Fluid Name: Spalter Bottoms		60# Steam	
Total Fluid: lb/h	437,150	19,561	
Vapor: lb/h		181,146	
Liquid: lb/h	437,150	306,005	
Steam: lb/h		19,561	
Water: lb/h		19,561	
Surface Tension: Dyn/cm	7.77	7.90	
MW (Liq/Vap):	66.9	66.9/66.9	
Density (Liq/Vap) at P&T: lb/ft ³	33.38	33.38/1.121	
Viscosity (Liq/Vap): cP	0.108	0.108/0.009	
Therm. Cond. (Liq/Vap): Btu/h ft °F	0.048	0.048/0.011	
Specific Heat (Liq/Vap): Btu/lb °F	0.842	0.848	
Latent Heat: Btu/lb			
Operating Temperature: °F	146.8	146.8	
Velocity Average: ft/s		290.1	
Pressure Drop: PSI	Allowed: 1.0	Calc.: 42.0	
Inlet Operating Pressure: PSIG	96.2	42.0	
Fouling Factor: h ft ² °F / Btu	0.002	0.001	
Film Coefficient: Btu/h ft ² °F			
Heat Duty: 18,162,000 Btu/h	MTD (corr.): °F: 142.8	% Overdesign: 3.268	
Transfer rate: Btu/h ft ² °F	Service: 22.8	Clean: 142.8	
CONSTRUCTION OF ONE SHELL			
Design/Test Pressure: PSIG		Shell Side: 228/340	Tube Side: 150/226
Design Temperature: °F		350	450
No. of Passes Per Shell:			
Corrosion Allowance: in.		1/8	1/8
Connections:	In: 2 X 8"/150 PSIG RF	6"/150 PSIG RF	
Size in. & Rating:	Out: 2 X 10"/150 PSIG RF	3"/150 PSIG RF	
Intermediate:			
Insulation:	Hot	Hot	
Tube No.: 700	O.D. in.: 3/4	Thick/WG: 14	MATERIALS (According to ASTM): II
Length in.: Pitch in.: 33	Shell		Carbon Steel
Shell I.D.:	Tube Sheet		Carbon Steel
Baffles Type:	Shell Cover		Carbon Steel
Spacing: Central:	Channel		Carbon Steel
No. of baffles:	Channel Cover		Carbon Steel
Baffle Long:	Flare Head Cover		Carbon Steel
Impingement Plate:	Baffles		
(FOR THERMO-PHONS ONLY)			
Uc. Blade head Required:	Tube Supports		Carbon Steel
dx2: lb/ft ² :	BOLTINGS		
In:	Shell Cover		
Out:	Shell / Channel		
Intermediate:	Flaring Head		
T.L.M.A. Class:	Expansion Joint		Channel Cover
Weight: Empty:	Code Requirements:		
	lb. Full of Water:	lb. Tube Bundle	
NOTES: E-408 has finned tubes. Existing heat exchanger relocated from existing alkylation unit. Normal operating duty = 14,646 MW&TU/hr.			
E-408 is to be converted from a once-through reboiler to a recirculating thermosiphon reboiler with 30 wt.% vaporization.			
E&C contractor is to evaluate if shellside nozzle sizes are adequate. Shellside piping sizes are to be verified by E&C contractor.			
B	Final Issue	4/21/97	
A	Preliminary Issue	3/27/97	
Rev	Description	Date	By

Figura A4. Hoja de especificaciones del rehervidor E-409 de la torre T-4566

Anexo B. Tabla de desviación estandarizada (z)

z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.0000	0.0040	0.0080	0.0120	0.0160	0.0199	0.0239	0.0279	0.0319	0.0359
0.1	0.0398	0.0438	0.0478	0.0517	0.0557	0.0596	0.0636	0.0675	0.0714	0.0753
0.2	0.0793	0.0832	0.0871	0.0910	0.0948	0.0987	0.1026	0.1064	0.1103	0.1141
0.3	0.1179	0.1217	0.1255	0.1293	0.1331	0.1368	0.1406	0.1443	0.1480	0.1517
0.4	0.1554	0.1591	0.1628	0.1664	0.1700	0.1736	0.1772	0.1808	0.1844	0.1879
0.5	0.1915	0.1950	0.1985	0.2019	0.2054	0.2088	0.2123	0.2157	0.2190	0.2224
0.6	0.2257	0.2291	0.2324	0.2357	0.2389	0.2422	0.2454	0.2486	0.2517	0.2549
0.7	0.2580	0.2611	0.2642	0.2673	0.2703	0.2734	0.2764	0.2794	0.2823	0.2852
0.8	0.2881	0.2910	0.2939	0.2967	0.2995	0.3023	0.3051	0.3078	0.3106	0.3133
0.9	0.3159	0.3186	0.3212	0.3238	0.3264	0.3289	0.3315	0.3340	0.3365	0.3389
1.0	0.3413	0.3438	0.3461	0.3485	0.3508	0.3531	0.3554	0.3577	0.3599	0.3621
1.1	0.3643	0.3665	0.3686	0.3708	0.3729	0.3749	0.3770	0.3790	0.3810	0.3830
1.2	0.3849	0.3868	0.3888	0.3907	0.3925	0.3944	0.3962	0.3980	0.3997	0.4015
1.3	0.4032	0.4049	0.4066	0.4082	0.4099	0.4115	0.4131	0.4147	0.4162	0.4177
1.4	0.4192	0.4207	0.4222	0.4236	0.4251	0.4265	0.4279	0.4292	0.4306	0.4319
1.5	0.4332	0.4345	0.4357	0.4370	0.4382	0.4394	0.4406	0.4418	0.4429	0.4441
1.6	0.4452	0.4463	0.4474	0.4484	0.4495	0.4505	0.4515	0.4525	0.4535	0.4545
1.7	0.4554	0.4564	0.4573	0.4582	0.4591	0.4599	0.4608	0.4616	0.4625	0.4633
1.8	0.4641	0.4649	0.4656	0.4664	0.4671	0.4678	0.4686	0.4693	0.4699	0.4706
1.9	0.4713	0.4719	0.4726	0.4732	0.4738	0.4744	0.4750	0.4755	0.4761	0.4767
2.0	0.4772	0.4778	0.4783	0.4788	0.4793	0.4798	0.4803	0.4808	0.4812	0.4817
2.1	0.4821	0.4826	0.4830	0.4834	0.4838	0.4842	0.4846	0.4850	0.4854	0.4857
2.2	0.4861	0.4864	0.4868	0.4871	0.4875	0.4878	0.4881	0.4884	0.4887	0.4890
2.3	0.4893	0.4896	0.4898	0.4901	0.4904	0.4906	0.4909	0.4911	0.4913	0.4916
2.4	0.4918	0.4920	0.4922	0.4925	0.4927	0.4929	0.4931	0.4932	0.4934	0.4936
2.5	0.4938	0.4940	0.4941	0.4943	0.4945	0.4946	0.4948	0.4949	0.4951	0.4952
2.6	0.4953	0.4955	0.4956	0.4957	0.4959	0.4960	0.4961	0.4962	0.4963	0.4964
2.7	0.4965	0.4966	0.4967	0.4968	0.4969	0.4970	0.4971	0.4972	0.4973	0.4974
2.8	0.4974	0.4975	0.4976	0.4977	0.4977	0.4978	0.4979	0.4979	0.4980	0.4981
2.9	0.4981	0.4982	0.4982	0.4983	0.4984	0.4984	0.4985	0.4985	0.4986	0.4986
3.0	0.4987	0.4987	0.4987	0.4988	0.4988	0.4989	0.4989	0.4989	0.4990	0.4990

Para el cálculo de la desviación estándar se debe conocer el intervalo de confianza, en este caso se tomó 95% siendo el más común.

$$95\% = 0,95 \rightarrow 0,95/2 = 0,475 \rightarrow 1.9+0.06 = 1.96$$

Anexo C. Histórico para elegir la toma de muestra

Se cuenta con una muestra de 365 datos promedios (cada día del año 2017), de la sección de carga de la U-4560 correspondiente a la T-4566 y la T-2004 de la U-2000 obtenidos de la base de datos de la GRB para su simulación y optimización. En la Figura 11 se observa el comportamiento de las cargas. Para la validación de la simulación se escogieron las 76 muestras basadas en los días en que se encontró en un estado pseudoestacionario aun siendo una carga considerablemente inestable a nivel operativo



Figura C1. Datos históricos carga de GLP a la torre de destilación T-4566 Y T-2004 en el año 2017.

El eje X corresponde a los datos históricos tomados cada día a partir del 1 de Enero de 2017 al 1° de enero del 2017

Anexo D. Especificaciones de las Torres T-2004 y T-4566 como datos de entrada en las 76 muestras tomadas para la simulación y validación.

Tabla D1. Condiciones de operación de la T-2004

ESPECIFICACIONES DE LA T-2004					
FECHA	PRESIÓN DE CIMA (PSIA)	FLUJO CARGA (BPD)	PRESIÓN DE CARGA (PSIA)	TEMPERATURA DE CARGA (°F)	REFLUJO (BPD)
08/01/2017	89	6225	205	122	2731
09/01/2017	89	6235	203	121	2792
10/01/2017	89	5959	202	127	2730
11/01/2017	89	6188	201	128	2430
12/01/2017	89	6100	202	126	2022
13/01/2017	89	6100	204	124	2098
15/01/2017	89	6187	203	120	2054
16/01/2017	89	6001	204	120	2093
04/02/2017	89	6500	205	131	2453
05/02/2017	89	5800	203	130	2488
06/02/2017	89	6100	199	125	2290

07/02/2017	89	6233	201	129	2297
08/02/2017	89	5900	202	120	2217
09/02/2017	89	6000	202	128	2158
14/02/2017	89	6267	201	127	2540
18/02/2017	86	6375	200	122	2911
27/02/2017	104	6320	207	125	2678
12/04/2017	87	5618	207	123	2227
18/04/2017	87	6189	206	129	2014
24/04/2017	86	5250	210	122	2359
01/05/2017	86	5150	211	120	2790
02/05/2017	86	5543	209	128	2790
03/05/2017	91	5079	210	128	2790
16/05/2017	89	5854	207	140	2470
19/05/2017	84	4829	211	121	2470
24/05/2017	88	5455	211	122	3030
26/05/2017	91	5282	210	125	3510
27/05/2017	87	5014	208	128	3510
28/05/2017	89	5025	207	120	3510
01/06/2017	88	5086	211	122	3510
02/06/2017	90	5220	211	127	3770
03/06/2017	86	5375	210	126	3270
04/06/2017	83	5131	211	128	2950
11/06/2017	88	6110	208	131	3350
14/06/2017	88	6214	209	121	3350
15/06/2017	87	6922	209	125	3350
30/06/2017	86	6299	209	127	2730
01/07/2017	86	5688	207	129	2890
02/07/2017	96	5183	207	132	3050
03/07/2017	90	5643	208	132	2970
07/07/2017	88	5186	210	127	2170
09/07/2017	82	5239	209	124	2563
10/07/2017	85	4948	209	123	2570
12/07/2017	81	4988	210	124	2444
01/09/2017	81	3296	207	127	2660
02/09/2017	90	3546	201	128	2961
03/09/2017	88	3341	200	135	2760
04/09/2017	85	3519	200	130	2280
05/09/2017	76	3619	200	124	1880
06/09/2017	77	3427	200	126	1960
07/09/2017	74	3162	199	128	2200
09/09/2017	87	3096	199	129	3080
10/09/2017	81	3447	201	120	3080
11/09/2017	87	3304	199	126	2440

12/09/2017	86	3379	200	125	2440
13/09/2017	80	3517	201	127	2456
14/09/2017	81	3371	200	126	2200
15/09/2017	87	3375	198	172	3240
16/09/2017	92	3404	200	145	3185
17/09/2017	81	3697	204	172	2873
19/09/2017	82	3373	204	187	2920
20/09/2017	85	3429	205	181	2760
28/09/2017	76	5068	211	159	1480
29/09/2017	86	5152	209	194	2680
01/10/2017	80	4526	209	188	3312
15/10/2017	78	5292	208	158	1920
18/10/2017	90	5216	207	149	3040
23/10/2017	78	5430	210	135	2080
18/11/2017	97	4997	257	130	3360
21/11/2017	89	4964	255	137	2880
26/11/2017	94	5249	259	138	2720
27/11/2017	92	4839	257	128	2629
28/11/2017	87	5083	256	142	2403
18/12/2017	73	5055	258	119	1056
19/12/2017	76	4903	256	121	1056
24/12/2017	71	4663	257	183	1519

Tabla D2. Condiciones de operación de la T-4566

ESPECIFICACIONES DE LA T-4566						
FECHA	PRESIÓN DE CIMA (PSIA)	TEMPERATURA CONDENSADOR	TEMPERATURA REHERVIDOR	FLUJO CARGA A PLATO 22 (BPD)	FLUJO CARGA PLATO 38 (BPD)	REFLUJO (BPD)
08/01/2017	85	89	144	740	2397	12804
09/01/2017	86	86	140	1370	2388	12814
10/01/2017	85	84	143	1252	2261	12622
11/01/2017	85	84	141	1262	2166	12840
12/01/2017	84	85	143	1469	2200	12486
13/01/2017	86	85	143	1640	2200	12490
15/01/2017	85	84	143	1465	2300	12481
16/01/2017	85	85	143	1430	2301	12844
04/02/2017	86	88	146	1599	2328	12799
05/02/2017	86	90	145	1475	2343	12880
06/02/2017	84	89	150	2637	1295	12099
07/02/2017	84	90	144	2635	1122	12669
08/02/2017	84	90	145	2831	1247	12799
09/02/2017	84	90	146	1689	2385	12416

14/02/2017	83	87	144	1436	2355	12629
18/02/2017	83	86	143	1540	2272	12671
27/02/2017	82	85	144	2971	869	13066
12/04/2017	84	88	144	1526	1408	11103
18/04/2017	84	102	145	1676	1502	11045
24/04/2017	82	92	140	1545	1364	11005
01/05/2017	84	89	141	1719	1339	10969
02/05/2017	84	89	141	1785	1336	10960
03/05/2017	84	91	144	1731	1303	10844
16/05/2017	87	88	141	1980	1483	12008
19/05/2017	87	88	140	1690	1533	12028
24/05/2017	87	90	143	1791	1428	12012
26/05/2017	87	95	144	2025	1514	12012
27/05/2017	87	87	146	2107	1335	12008
28/05/2017	86	87	142	2042	1400	12067
01/06/2017	86	86	141	2098	1338	12004
02/06/2017	88	90	147	1986	1388	11798
03/06/2017	86	90	143	1924	1441	11987
04/06/2017	86	93	142	1990	1482	12000
11/06/2017	86	88	142	2021	1189	11997
14/06/2017	86	89	141	1628	1375	11989
15/06/2017	86	88	141	1996	1465	12006
30/06/2017	85	83	139	1906	1556	10195
01/07/2017	85	87	141	2010	1406	11302
02/07/2017	85	95	144	1990	1478	11005
03/07/2017	85	83	142	2004	1656	10994
07/07/2017	85	89	142	1857	1728	11757
09/07/2017	85	88	142	1534	1742	11997
10/07/2017	85	94	142	1220	2265	12000
12/07/2017	85	90	141	1113	2427	12434
01/09/2017	86	87	140	1288	984	10991
02/09/2017	86	88	145	2184	260	11012
03/09/2017	86	86	141	2405	502	11210
04/09/2017	86	87	141	2575	1300	11399
05/09/2017	86	86	141	2367	1274	11405
06/09/2017	85	86	139	2427	1002	11397
07/09/2017	74	82	135	2179	540	11288
09/09/2017	86	84	141	1950	367	11491
10/09/2017	77	81	132	2339	1005	11511
11/09/2017	86	84	140	2729	225	11504
12/09/2017	86	87	140	2449	576	11500
13/09/2017	84	84	142	2273	384	11499
14/09/2017	86	87	142	1946	469	11703
15/09/2017	84	86	137	2021	584	11715

16/09/2017	86	85	144	1297	258	11688
17/09/2017	86	85	143	1897	854	11342
19/09/2017	86	84	144	1789	427	10765
20/09/2017	85	87	143	2259	693	11000
28/09/2017	83	86	141	2393	402	11249
29/09/2017	86	85	144	1632	1673	11243
01/10/2017	82	82	140	1573	419	11583
15/10/2017	86	86	142	2646	804	11752
18/10/2017	86	89	145	2191	452	11745
23/10/2017	86	87	142	2242	447	12009
18/11/2017	85	82	140	2459	597	12920
21/11/2017	86	84	139	892	1897	12454
26/11/2017	85	94	143	956	2410	12399
27/11/2017	85	95	144	1089	2400	12413
28/11/2017	85	93	142	1002	1823	12399
18/12/2017	83	88	140	432	2275	12503
19/12/2017	83	87	141	349	2223	12421
24/12/2017	83	88	144	278	2440	12501

Tabla de datos históricos de flujos y composiciones usados como datos de entrada de las 76 muestras simuladas.

Tabla D3. Cromatografía del flujo de GLP de la UOPI

FECHA	FLUJO (BPD)	CROMATOGRAFÍA GLP DE LA UOPI													
		C2	C3	C3=	IC4	1-C4	n-C4	IC4=	T-2-C4=	ciclo-C5	IC5	n-C5	Cis-2-C4=	C5+	1,3-C4=
08-ene-17	154	0,0	1,6	0,2	23,6	13,9	20,0	24,2	10,6	0,0	0,0	0,0	4,8	0,0	1,0
09-ene-17	153	0,1	1,1	0,2	22,8	14,7	18,4	25,5	11,0	0,0	0,0	0,0	5,2	0,0	1,0
10-ene-17	158	0,0	0,0	0,0	23,3	14,6	19,7	25,5	10,9	0,0	0,0	0,0	4,8	0,0	1,1
11-ene-17	160	0,0	0,2	0,0	24,8	14,7	18,5	25,9	10,2	0,0	0,0	0,0	4,6	0,0	1,1
12-ene-17	158	0,0	0,1	0,0	27,3	17,1	13,0	30,4	8,0	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	1,3
13-ene-17	157	0,0	3,5	0,7	22,8	15,3	14,7	26,6	10,5	0,0	0,0	0,0	4,8	0,0	1,1
15-ene-17	156	0,0	2,7	0,5	22,4	15,9	14,9	27,7	10,5	0,0	0,0	0,0	4,2	0,0	1,2
16-ene-17	156	0,0	3,1	0,5	23,3	16,5	14,1	29,0	8,9	0,0	0,0	0,0	3,2	0,0	1,3
04-feb-17	156	0,0	0,2	0,0	27,1	15,7	14,7	26,6	10,6	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	0,9
05-feb-17	156	0,0	0,1	0,0	25,8	15,3	15,4	26,0	11,5	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,9
06-feb-17	155	0,0	0,1	0,0	26,1	15,5	14,8	26,2	11,4	0,0	0,0	0,0	4,9	0,0	0,9
07-feb-17	155	0,0	0,0	0,0	25,2	12,3	19,0	18,9	14,1	0,0	0,3	0,0	9,2	0,4	0,6
08-feb-17	154	0,0	0,1	0,0	26,7	15,8	14,3	26,8	10,9	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	1,0
09-feb-17	154	0,0	0,1	0,0	26,6	15,4	15,3	26,1	11,0	0,0	0,0	0,0	4,7	0,0	0,9
14-feb-17	143	0,0	0,2	0,0	25,7	15,3	15,4	26,0	11,3	0,0	0,0	0,0	5,1	0,0	1,0
18-feb-17	143	0,0	0,6	0,1	17,4	13,2	18,2	22,6	14,3	0,0	0,8	0,0	10,5	2,0	1,2
27-feb-17	147	0,0	2,0	0,4	20,5	13,6	16,9	23,1	13,7	0,0	0,0	0,0	8,9	0,0	1,0
12-abr-17	152	0,0	0,1	0,0	28,2	14,6	16,4	24,3	9,8	0,0	0,0	0,0	5,2	0,1	1,3
18-abr-17	152	0,0	0,2	0,0	24,3	14,0	16,4	22,8	12,9	0,0	0,0	0,0	8,3	0,1	1,2

24-abr-17	152	0,0	0,1	0,0	25,3	14,1	15,8	23,4	12,4	0,0	0,0	0,0	7,8	0,0	1,1
01-may-17	152	0,0	0,5	0,1	27,2	13,7	15,0	21,5	12,8	0,0	0,0	0,0	8,3	0,1	0,9
02-may-17	152	0,0	0,2	0,0	26,3	13,7	15,6	22,1	12,8	0,0	0,0	0,0	8,3	0,1	1,0
03-may-17	153	0,0	0,1	0,0	28,4	14,2	14,8	7,6	11,8	0,0	0,0	0,0	22,0	0,0	1,0
16-may-17	152	0,0	0,1	0,0	27,8	12,9	15,1	20,3	12,7	0,0	1,1	0,0	8,5	1,9	0,7
19-may-17	153	0,0	0,1	0,0	27,9	12,3	14,8	18,9	12,5	0,0	2,6	0,1	8,5	4,4	0,6
24-may-17	152	0,0	0,1	0,0	27,5	12,9	14,8	9,3	12,7	0,0	1,9	0,1	19,2	2,8	0,7
26-may-17	152	0,0	0,0	0,0	25,7	15,6	8,7	24,6	14,7	0,0	0,0	0,0	9,6	0,1	0,9
27-may-17	152	0,0	0,5	0,1	27,8	13,5	13,9	21,3	13,1	0,0	0,2	0,0	8,8	0,4	0,8
28-may-17	152	0,0	0,0	0,0	27,5	12,5	14,4	19,5	12,3	0,0	2,7	0,1	8,4	4,6	0,7
01-jun-17	153	0,0	0,0	0,0	23,6	15,9	8,1	25,2	15,1	0,0	0,4	0,0	10,2	1,0	1,0
02-jun-17	152	0,0	0,0	0,0	24,8	16,1	7,8	25,4	14,7	0,0	0,1	0,0	9,8	0,4	1,0
03-jun-17	152	0,0	0,1	0,0	24,9	14,2	10,6	22,5	13,5	0,0	2,2	0,1	9,2	4,1	0,8
04-jun-17	152	0,1	0,0	0,0	27,7	13,5	14,4	22,3	12,6	0,0	0,1	0,0	8,4	0,2	0,8
11-jun-17	142	0,0	0,0	0,0	27,1	14,6	10,3	23,4	13,9	0,0	0,3	0,0	9,4	0,6	0,8
14-jun-17	142	0,0	0,0	0,0	29,4	14,3	10,3	23,5	12,9	0,0	0,1	0,0	8,4	0,2	0,8
15-jun-17	142	0,2	0,1	0,2	24,7	13,9	10,6	23,2	13,4	0,0	0,8	0,3	9,4	2,9	0,8
30-jun-17	133	0,0	0,0	0,0	31,7	14,3	12,3	23,0	11,3	0,0	0,0	0,0	6,4	0,0	0,8
01-jul-17	80	0,0	0,1	0,0	30,7	13,8	13,0	21,5	12,4	0,0	0,0	0,0	7,8	0,0	0,8
02-jul-17	7	0,0	0,0	0,0	30,3	14,0	12,7	22,4	12,3	0,0	0,0	0,0	7,6	0,0	0,8
03-jul-17	6	0,0	0,0	0,0	30,3	14,0	12,7	22,4	12,3	0,0	0,0	0,0	7,6	0,0	0,8
07-jul-17	134	0,0	0,0	0,0	29,2	13,2	13,9	20,9	12,9	0,0	0,3	0,0	8,6	0,6	0,7
09-jul-17	132	0,0	0,1	0,0	31,7	13,1	14,2	19,2	12,7	0,0	0,0	0,0	8,1	0,9	0,0
10-jul-17	129	0,0	0,0	0,0	30,5	12,1	13,5	17,6	12,6	0,0	2,6	0,1	8,8	4,2	0,6
12-jul-17	138	0,0	0,2	0,0	33,8	12,7	13,4	19,0	12,0	0,0	0,1	0,0	7,9	0,3	0,6
01-sep-17	150	0,0	2,5	1,1	22,0	13,8	12,4	20,8	14,3	0,0	1,2	0,1	9,8	2,5	0,8
02-sep-17	150	0,0	0,1	0,1	31,8	14,7	13,1	21,9	11,6	0,0	0,0	0,0	6,0	0,0	0,7
03-sep-17	150	0,0	0,0	0,0	32,3	14,7	12,7	22,0	11,3	0,0	0,0	0,0	5,8	0,4	0,7
04-sep-17	149	0,0	0,0	0,0	33,4	15,4	12,0	23,6	10,1	0,0	0,0	0,0	4,6	0,0	0,8
05-sep-17	148	0,0	0,0	0,0	34,7	15,5	11,6	23,9	9,4	0,0	0,0	0,0	4,1	0,0	0,8
06-sep-17	150	0,0	0,0	0,0	33,5	14,9	12,8	22,7	10,4	0,0	0,0	0,0	4,9	0,0	0,8
07-sep-17	151	0,0	0,1	0,0	32,9	15,2	12,6	23,2	10,4	0,0	0,0	0,0	4,8	0,0	0,8
09-sep-17	150	0,0	0,5	0,1	34,0	15,1	12,2	22,9	9,9	0,0	0,0	0,0	4,6	0,0	0,7
10-sep-17	153	0,0	4,9	1,8	27,8	13,7	13,4	20,5	11,3	0,0	0,0	0,0	6,0	0,0	0,7
11-sep-17	152	0,0	1,5	0,4	31,9	14,9	12,5	22,6	10,4	0,0	0,0	0,0	4,9	0,0	0,8
12-sep-17	152	0,0	0,9	0,2	33,8	14,6	12,3	22,0	10,2	0,0	0,0	0,0	5,1	0,0	0,8
13-sep-17	152	0,0	0,7	0,2	32,4	14,3	13,4	21,0	11,3	0,0	0,0	0,0	6,0	0,0	0,7
14-sep-17	151	0,0	0,8	0,2	35,0	14,5	12,4	21,2	10,2	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,7
15-sep-17	150	0,0	0,2	0,0	33,1	14,2	13,6	20,4	11,5	0,0	0,0	0,0	6,4	0,0	0,7
16-sep-17	50	0,0	0,0	0,0	36,8	14,8	11,9	21,7	9,6	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,7
17-sep-17	103	0,0	0,0	0,0	36,8	14,8	11,9	21,7	9,6	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,7
19-sep-17	25	0,0	0,0	0,0	36,8	14,8	11,9	21,7	9,6	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,7
20-sep-17	9	0,0	0,0	0,0	36,8	14,8	11,9	21,7	9,6	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,7
28-sep-17	3	0,0	0,0	0,0	36,8	14,8	11,9	21,7	9,6	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,7

29-sep-17	5	0,0	0,0	0,0	36,8	14,8	11,9	21,7	9,6	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,7
01-oct-17	48	0,0	0,0	0,0	36,8	14,8	11,9	21,7	9,6	0,0	0,0	0,0	4,4	0,0	0,7
15-oct-17	146	0,0	1,2	0,2	31,6	13,6	13,2	20,5	11,8	0,0	0,0	0,0	7,1	0,0	0,7
18-oct-17	147	0,0	0,0	0,0	29,8	14,4	13,8	21,1	12,2	0,0	0,0	0,0	6,9	1,9	0,0
23-oct-17	146	0,0	0,1	0,0	31,5	13,8	13,7	20,7	12,1	0,0	0,0	0,0	7,4	0,0	0,7
18-nov-17	144	0,0	0,1	0,0	34,3	13,8	11,5	19,2	12,8	0,0	0,0	0,0	7,6	0,2	0,5
21-nov-17	143	0,0	0,2	0,0	34,2	13,6	12,3	19,9	11,9	0,0	0,0	0,0	7,3	0,0	0,6
26-nov-17	143	0,0	7,2	0,8	31,2	11,2	15,1	16,5	10,5	0,0	0,0	0,0	6,8	0,2	0,4
27-nov-17	143	0,0	1,4	0,1	35,1	11,9	15,8	17,5	11,0	0,0	0,0	0,0	7,1	0,2	0,0
28-nov-17	142	0,0	0,0	0,0	31,8	12,6	17,3	18,1	12,1	0,0	0,0	0,4	7,7	0,6	0,0
18-dic-17	143	0,0	0,3	0,0	33,0	13,9	13,4	21,7	10,9	0,0	0,0	0,0	6,2	0,1	0,7
19-dic-17	143	0,0	0,0	0,0	33,0	14,3	12,8	22,4	10,8	0,0	0,0	0,0	5,9	0,1	0,7
24-dic-17	143	0,0	0,0	0,0	31,8	13,8	13,8	21,1	11,7	0,0	0,0	0,0	7,1	0,0	0,6

Tabla D4. Cromatografía del flujo de GLP de la UOPII

FECHA	FLUJO (BPD)	CROMATOGRFÍA GLP DE UOPII													
		C2	C3	C3=	IC4	1-C4	n-C4	IC4=	T-2-C4=	ciclo-C5	IC5	n-C5	Cis-2-C4=	C5+	1,3-C4=
08-ene-17	4803	0,0	0,7	0,2	21,1	11,7	22,1	18,8	13,9	0,0	0,0	0,9	9,7	0,8	0,0
09-ene-17	4383	0,0	0,0	0,0	23,3	15,6	14,0	25,5	13,3	0,0	0,0	1,1	6,5	0,8	0,0
10-ene-17	4101	0,0	0,0	0,0	23,3	14,0	16,1	22,9	13,8	0,0	0,0	1,1	8,0	0,9	0,0
11-ene-17	4512	0,0	0,0	0,0	23,3	14,0	16,1	22,9	13,8	0,0	0,0	1,1	8,0	0,9	0,0
12-ene-17	4383	0,0	0,2	0,1	23,6	15,0	12,9	24,0	14,5	0,0	0,0	1,0	8,0	0,8	0,0
13-ene-17	4224	0,0	0,1	0,0	24,9	12,9	18,2	20,2	13,8	0,0	0,0	0,8	8,4	0,6	0,0
15-ene-17	4082	0,0	0,0	0,0	23,3	12,8	20,8	20,5	13,1	0,0	0,0	0,9	7,6	1,0	0,0
16-ene-17	3896	0,0	0,0	0,0	27,9	12,4	21,1	20,2	10,8	0,0	0,0	0,8	5,8	0,9	0,0
04-feb-17	4875	0,0	0,1	0,0	28,2	14,2	11,7	21,5	14,6	0,0	0,0	0,7	8,6	0,5	0,0
05-feb-17	3290	0,0	0,1	0,0	28,2	14,2	11,7	21,5	14,6	0,0	0,0	0,7	8,6	0,5	0,0
06-feb-17	4343	0,0	0,6	0,2	26,5	12,4	17,9	19,0	13,7	0,0	0,0	0,6	8,6	0,5	0,0
07-feb-17	4620	0,0	0,1	0,0	26,6	15,5	14,7	26,1	11,3	0,0	0,0	1,0	4,8	0,0	0,0
08-feb-17	4167	0,0	0,1	0,0	26,6	15,5	14,7	26,1	11,3	0,0	0,0	1,0	4,8	0,0	0,0
09-feb-17	4346	0,0	0,0	0,0	26,2	11,5	20,6	16,3	14,4	0,0	0,0	0,5	10,1	0,3	0,0
14-feb-17	4530	0,0	2,6	0,8	28,7	11,4	18,8	16,3	12,5	0,0	0,0	0,5	8,1	0,3	0,0
18-feb-17	4149	0,0	0,9	0,2	33,5	14,3	12,7	22,4	10,5	0,0	0,0	0,6	4,9	0,0	0,0
27-feb-17	4775	0,0	0,8	0,2	28,4	11,5	17,6	15,7	14,3	0,0	0,0	0,4	10,4	0,6	0,0
12-abr-17	4371	0,0	4,5	1,5	25,4	10,5	24,0	15,8	10,9	0,0	0,0	0,6	6,5	0,3	0,0
18-abr-17	4199	0,0	5,4	5,3	23,3	9,8	20,1	14,0	12,0	0,0	0,0	0,5	8,8	0,7	0,0
24-abr-17	2965	0,0	0,0	0,0	30,3	14,9	10,9	20,4	14,8	0,0	0,0	0,6	7,8	0,3	0,0
01-may-17	3289	0,0	0,1	0,0	25,4	14,6	10,5	20,9	17,1	0,0	0,0	0,6	10,4	0,5	0,0
02-may-17	3682	0,0	1,2	0,2	28,9	16,2	8,9	24,0	13,3	0,0	0,0	0,7	6,0	0,5	0,0
03-may-17	3212	0,0	1,2	0,2	28,9	16,2	8,9	24,0	13,3	0,0	0,0	0,7	6,0	0,5	0,0
16-may-17	4004	0,0	0,1	0,0	32,1	13,2	16,1	18,6	12,4	0,0	0,0	0,5	6,6	0,3	0,0
19-may-17	3030	0,0	7,7	4,1	22,7	9,8	20,1	14,9	11,6	0,0	0,0	0,4	8,2	0,4	0,1
24-may-17	3365	0,0	0,3	0,1	27,7	14,3	14,6	21,4	13,2	0,0	0,0	0,0	7,0	1,5	0,1

26-may-17	4399	0,0	2,8	1,0	25,0	9,6	26,5	14,5	11,4	0,0	0,0	0,5	7,9	0,8	0,0
27-may-17	4156	0,0	0,0	0,0	28,0	12,6	19,4	19,1	12,5	0,0	0,0	0,6	7,0	0,6	0,0
28-may-17	3798	0,0	0,0	0,0	27,6	12,4	17,9	17,9	14,1	0,0	0,0	0,6	8,9	0,6	0,0
01-jun-17	3883	0,0	1,4	0,2	25,3	11,6	19,9	17,6	13,2	0,0	0,0	0,6	9,1	1,0	0,0
02-jun-17	4252	0,0	1,4	0,2	25,3	11,6	19,9	17,6	13,2	0,0	0,0	0,6	9,1	1,0	0,0
03-jun-17	4423	0,0	3,7	0,7	23,9	11,5	21,0	18,4	12,4	0,0	0,0	0,7	7,5	0,3	0,0
04-jun-17	4108	0,0	3,7	0,7	23,9	11,5	21,0	18,4	12,4	0,0	0,0	0,7	7,5	0,3	0,0
11-jun-17	4207	0,0	0,1	0,0	29,8	12,9	18,7	19,2	12,1	0,0	0,0	0,6	6,1	0,4	0,0
14-jun-17	3750	0,0	4,1	0,9	26,2	10,6	21,4	15,6	12,2	0,0	0,0	0,5	8,1	0,4	0,0
15-jun-17	4771	0,0	3,8	1,0	27,5	14,2	10,9	19,9	13,7	0,0	0,0	0,6	8,3	0,2	0,0
30-jun-17	3462	0,0	5,7	2,8	24,9	9,7	21,1	15,2	11,6	0,0	0,0	0,5	7,9	0,6	0,0
01-jul-17	4519	0,0	5,6	2,7	26,9	10,7	18,0	16,3	11,3	0,0	0,0	0,5	6,8	1,1	0,0
02-jul-17	4281	0,0	5,6	2,7	26,9	10,7	18,0	16,3	11,3	0,0	0,0	0,5	6,8	1,1	0,0
03-jul-17	4640	0,0	3,5	1,1	31,6	10,7	19,5	15,3	10,9	0,0	0,0	0,4	6,4	0,6	0,0
07-jul-17	3762	0,0	6,0	3,4	28,0	11,8	14,1	17,3	11,7	0,0	0,0	0,5	6,3	0,8	0,0
09-jul-17	2337	0,0	5,2	3,0	24,8	9,8	21,4	14,5	11,9	0,0	0,0	0,4	8,2	0,6	0,0
10-jul-17	2900	0,0	6,0	3,7	29,5	11,2	22,2	15,9	0,0	0,0	0,0	0,4	10,5	0,5	0,0
12-jul-17	998	0,0	1,4	0,4	27,4	11,0	19,5	15,8	13,6	0,0	0,0	0,4	9,8	0,6	0,0
01-sep-17	3756	0,0	1,7	0,6	33,1	13,3	11,9	18,0	13,4	0,0	0,0	0,5	7,2	0,3	0,0
02-sep-17	3562	0,0	0,8	0,2	30,9	14,6	10,3	20,5	14,2	0,0	0,0	0,6	7,4	0,6	0,0
03-sep-17	3157	0,0	5,9	2,5	28,6	13,9	9,0	20,2	12,4	0,0	0,0	0,6	6,4	0,4	0,0
04-sep-17	3395	0,0	0,2	0,0	23,3	13,7	13,2	19,6	17,2	0,0	0,0	0,6	10,7	1,4	0,0
05-sep-17	3075	0,0	0,0	0,0	30,6	14,5	10,4	20,8	14,2	0,0	0,0	0,6	7,4	1,4	0,0
06-sep-17	3451	0,0	0,2	0,0	34,6	15,1	9,8	21,1	12,0	0,0	0,0	0,6	5,4	1,1	0,0
07-sep-17	3932	0,0	0,0	0,0	33,7	15,3	9,7	21,3	12,8	0,0	0,0	0,6	5,8	0,6	0,0
09-sep-17	3413	0,0	2,4	0,6	32,2	13,9	10,4	18,9	13,5	0,0	0,0	0,6	7,2	0,4	0,0
10-sep-17	3333	0,0	2,4	0,6	32,2	13,9	10,4	18,9	13,5	0,0	0,0	0,6	7,2	0,4	0,0
11-sep-17	3294	0,0	1,1	0,3	29,8	13,9	9,1	18,8	16,0	0,0	0,0	0,5	9,6	0,9	0,0
12-sep-17	3166	0,0	0,2	0,0	33,1	15,0	8,3	20,6	14,2	0,0	0,0	0,6	7,1	1,0	0,0
13-sep-17	3117	0,0	0,2	0,0	33,1	15,0	8,3	20,6	14,2	0,0	0,0	0,6	7,1	1,0	0,0
14-sep-17	3138	0,0	0,0	0,0	31,1	14,9	8,9	20,1	15,3	0,0	0,0	0,6	8,2	0,8	0,0
15-sep-17	3272	0,0	0,0	0,0	31,1	14,9	8,9	20,1	15,3	0,0	0,0	0,6	8,2	0,8	0,0
16-sep-17	3788	0,0	0,1	0,0	31,2	14,4	10,7	19,6	14,8	0,0	0,0	0,6	8,0	0,7	0,0
17-sep-17	4006	0,0	0,1	0,0	31,2	14,4	10,7	19,6	14,8	0,0	0,0	0,6	8,0	0,7	0,0
19-sep-17	3888	0,0	1,2	0,4	33,2	12,4	14,2	16,3	13,4	0,0	0,0	0,4	7,9	0,7	0,0
20-sep-17	4820	0,0	1,2	0,4	33,2	12,4	14,2	16,3	13,4	0,0	0,0	0,4	7,9	0,7	0,0
28-sep-17	4264	0,0	3,1	0,7	29,1	11,4	14,9	15,5	14,2	0,0	0,0	0,5	10,1	0,5	0,0
29-sep-17	3972	0,0	2,5	0,5	28,6	11,1	16,5	14,8	14,1	0,0	0,0	0,4	10,6	0,9	0,0
01-oct-17	3747	0,0	1,4	0,4	34,1	12,5	13,0	16,3	13,2	0,0	0,0	0,4	8,0	0,6	0,0
15-oct-17	3961	0,0	1,8	0,5	32,3	14,5	9,3	20,1	13,4	0,0	0,0	0,6	6,8	0,7	0,0
18-oct-17	3977	0,0	0,0	0,0	31,7	13,9	11,3	19,6	14,1	0,0	0,0	0,7	7,9	0,8	0,0
23-oct-17	3731	0,0	0,0	0,0	32,3	13,4	13,8	18,8	13,5	0,0	0,0	0,6	7,3	0,4	0,0
18-nov-17	3430	0,0	0,0	0,0	33,8	14,7	7,5	19,9	15,3	0,0	0,0	0,5	8,3	0,0	0,0
21-nov-17	3519	0,0	5,8	1,8	29,9	14,1	7,3	18,9	14,4	0,0	0,0	0,5	7,3	0,0	0,0

26-nov-17	3875	0,0	2,3	0,4	32,9	14,8	7,6	19,5	14,6	0,0	0,0	0,6	7,3	0,2	0,0
27-nov-17	3747	0,0	7,7	3,3	30,0	13,3	7,0	17,7	13,3	0,0	0,0	0,5	7,0	0,2	0,0
28-nov-17	3441	0,0	5,6	2,5	30,4	13,6	7,1	18,5	13,6	0,0	0,0	0,9	7,6	0,2	0,0
18-dic-17	4912	0,0	0,1	0,1	33,0	14,7	11,6	20,9	12,6	0,0	0,0	0,6	5,7	0,8	0,0
19-dic-17	4760	0,0	0,1	0,0	32,7	14,1	12,7	20,1	12,6	0,0	0,0	0,6	5,9	1,3	0,0
24-dic-17	4520	0,0	0,0	0,0	34,9	14,0	11,9	18,9	13,1	0,0	0,0	0,5	6,4	0,3	0,0

Tabla D5. Cromatografía del flujo de GLP de Modelo IV

		CROMATOGRAFÍA GLP DE MODELO IV													
FECHA	FLUJO (BPD)	C2	C3	C3=	IC4	1-C4	n-C4	IC4=	T-2-C4=	ciclo-C5	IC5	n-C5	Cis-2-C4=	C5+	1,3-C4=
21-nov-17	892	0,1	3,9	4,1	32,0	7,4	20,9	10,1	9,3	0,0	4,5	0,2	6,4	5,7	0,1
26-nov-17	956	0,0	2,4	2,7	27,7	8,9	23,1	12,1	13,8	0,1	0,0	0,0	9,3	0,1	0,1
27-nov-17	1089	0,0	2,7	2,9	26,5	8,8	23,8	11,7	13,9	0,0	0,1	0,0	9,5	0,1	0,1
28-nov-17	1002	0,0	4,2	4,8	28,5	8,6	21,5	11,1	12,7	0,0	0,1	0,0	8,4	0,2	0,1
18-dic-17	432	0,0	4,7	5,4	30,7	9,5	16,9	12,7	12,0	0,0	0,0	0,0	7,3	0,6	0,1
19-dic-17	349	0,1	5,2	6,1	30,0	9,6	16,7	13,4	11,8	0,0	0,0	0,0	7,1	0,0	0,1
24-dic-17	278	0,0	3,3	3,8	27,5	9,6	20,1	13,7	13,2	0,0	0,0	0,0	8,7	0,1	0,1

Tabla D6. Cromatografía del flujo de GLP de Orthoflow

		CROMATOGRAFÍA DE GLP DE ORTHOFLOW													
FECHA	FLUJO (BPD)	C2	C3	C3=	IC4	1-C4	n-C4	IC4=	T-2-C4=	ciclo-C5	IC5	n-C5	Cis-2-C4=	C5+	1,3-C4=
08-ene-17	1268	0,0	3,6	1,2	20,1	13,1	17,2	21,9	12,6	0,0	0,2	0,0	8,0	0,1	0,8
09-ene-17	1698	0,0	2,9	0,6	20,4	14,0	15,9	21,9	12,9	0,0	0,2	0,0	7,8	0,1	0,8
10-ene-17	1700	0,0	6,2	5,6	19,5	12,8	15,1	21,9	10,9	0,0	0,2	0,0	6,4	0,0	0,8
11-ene-17	1515	0,0	12,4	1,6	19,6	13,0	12,7	21,9	10,5	0,0	0,2	0,0	6,1	0,1	0,8
12-ene-17	1559	0,0	21,5	2,1	21,1	11,2	10,2	21,9	8,0	0,0	0,2	0,0	4,5	0,0	0,8
13-ene-17	1719	0,0	1,2	0,6	24,8	14,0	16,8	21,9	12,0	0,0	0,2	0,0	7,1	0,1	0,8
15-ene-17	1949	0,0	16,9	2,6	19,5	12,0	13,0	21,9	8,6	0,0	0,2	0,0	4,7	0,0	0,8
16-ene-17	1949	0,0	31,2	3,7	13,2	10,0	10,6	21,9	8,0	0,0	0,2	0,0	4,5	0,0	0,8
04-feb-17	1469	0,0	10,1	1,4	12,5	13,0	19,0	21,9	12,2	0,0	0,2	0,0	7,7	0,1	0,8
05-feb-17	1582	0,0	30,6	5,4	12,8	9,4	10,6	21,9	8,6	0,0	0,2	0,0	5,2	0,0	0,8
06-feb-17	1602	0,0	23,8	9,8	15,7	8,9	11,6	21,9	7,3	0,0	0,2	0,0	4,3	0,1	0,8
07-feb-17	1457	0,0	21,7	12,9	26,8	6,7	9,1	21,9	5,9	0,0	0,2	0,0	3,5	0,1	0,8
08-feb-17	1579	0,0	23,4	7,7	23,9	7,9	11,9	21,9	6,6	0,0	0,2	0,0	3,8	0,0	0,8
09-feb-17	1500	0,0	2,6	0,7	20,3	10,7	24,3	21,9	11,6	0,0	0,2	0,0	8,1	2,0	0,8
14-feb-17	1594	1,3	61,1	6,1	8,4	4,0	5,2	21,9	2,8	0,0	0,2	0,0	1,6	0,0	0,8
18-feb-17	2082	0,0	6,5	7,8	16,4	11,6	19,1	21,9	10,3	0,0	0,2	0,0	6,2	0,1	0,8
27-feb-17	1398	0,0	15,2	0,9	19,3	11,2	16,1	21,9	9,8	0,0	0,2	0,0	5,6	0,0	0,8
12-abr-17	1095	0,0	27,3	10,4	20,6	9,4	7,8	21,9	7,2	0,0	0,2	0,0	4,1	0,0	0,8

18-abr-17	1922	0,0	6,7	9,7	20,9	11,7	15,4	21,9	9,2	0,0	0,2	0,0	5,2	0,0	0,8
24-abr-17	3053	0,0	13,6	4,2	25,8	9,2	13,2	21,9	8,7	0,0	0,2	0,0	5,7	0,4	0,8
01-may-17	1709	0,0	14,9	0,9	19,4	11,1	18,5	21,9	8,9	0,0	0,2	0,0	5,0	0,0	0,8
02-may-17	1709	0,0	9,7	1,3	18,3	11,6	21,9	21,9	10,2	0,0	0,2	0,0	6,0	0,0	0,8
03-may-17	1714	0,0	26,8	5,4	23,1	7,3	14,1	21,9	6,4	0,0	0,2	0,0	3,7	0,0	0,8
16-may-17	1697	0,0	2,4	1,1	23,9	15,1	12,1	21,9	12,3	0,0	0,2	0,0	6,7	0,0	0,8
19-may-17	1698	0,0	19,5	5,0	22,5	11,6	7,8	21,9	9,0	0,0	0,2	0,0	4,7	0,0	0,8
24-may-17	1938	0,0	24,7	7,5	24,3	8,9	7,7	21,9	7,5	0,0	0,2	0,0	4,3	0,0	0,8
26-may-17	2129	0,0	13,7	18,0	20,8	16,7	8,0	21,9	5,9	0,0	0,2	0,0	3,5	0,0	0,8
27-may-17	2540	0,0	10,3	14,7	21,1	11,1	10,1	21,9	9,1	0,0	0,2	0,0	5,2	0,0	0,8
28-may-17	1999	0,0	0,1	0,0	22,9	14,3	13,9	21,9	13,6	0,0	0,2	0,0	8,4	0,1	0,8
01-jun-17	1714	0,0	49,9	3,0	23,8	4,0	3,0	21,9	2,9	0,0	0,2	0,0	1,6	0,0	0,8
02-jun-17	1599	0,0	27,8	3,3	16,5	10,4	8,8	21,9	9,4	0,0	0,2	0,0	5,5	0,0	0,8
03-jun-17	1631	0,0	0,1	0,0	25,1	15,1	13,4	21,9	13,5	0,0	0,2	0,0	7,9	0,0	0,8
04-jun-17	1741	0,0	0,1	0,0	22,7	14,4	16,0	21,9	13,8	0,0	0,2	0,0	8,3	0,1	0,8
11-jun-17	1761	0,0	0,7	0,2	22,3	14,2	14,8	21,9	13,3	0,0	0,2	0,0	8,0	0,1	0,8
14-jun-17	2321	0,0	1,9	0,5	21,8	13,9	14,2	21,9	13,3	0,0	0,2	0,0	8,2	0,1	0,8
15-jun-17	2009	0,0	1,2	0,3	27,4	13,8	16,4	21,9	11,3	0,0	0,2	0,0	6,5	0,0	0,8
30-jun-17	2955	0,0	0,3	0,2	27,7	14,6	12,7	21,9	13,0	0,0	0,2	0,0	7,6	0,1	0,8
01-jul-17	2919	0,0	0,7	0,2	27,3	14,0	12,9	21,9	13,9	0,0	0,2	0,0	8,6	0,1	0,8
02-jul-17	2884	0,1	1,1	0,3	21,7	14,0	13,8	21,9	14,3	0,0	0,2	0,0	9,1	0,1	0,8
03-jul-17	2848	0,1	1,4	0,5	19,7	12,9	16,5	21,9	13,5	0,0	0,2	0,0	8,8	0,2	0,8
07-jul-17	2748	0,0	27,5	6,6	25,1	7,0	8,8	21,9	6,7	0,0	0,2	0,0	4,2	0,1	0,8
09-jul-17	2769	0,0	12,1	2,7	18,3	11,7	12,9	21,9	11,7	0,0	0,2	0,0	7,5	0,1	0,8
10-jul-17	2800	0,0	9,3	1,7	25,8	11,6	14,6	21,9	11,6	0,0	0,2	0,0	7,3	0,1	0,8
12-jul-17	2743	0,0	27,6	5,2	21,3	9,2	9,6	21,9	7,7	0,0	0,2	0,0	4,4	0,0	0,8
01-sep-17	1914	0,0	31,6	15,7	12,2	7,6	7,4	21,9	7,9	0,0	0,2	0,0	5,1	0,1	0,8
02-sep-17	1820	0,0	2,9	1,4	26,6	16,3	6,7	21,9	13,6	0,0	0,2	0,0	7,2	0,0	0,8
03-sep-17	1809	0,0	8,2	3,6	25,7	15,6	5,7	21,9	9,7	0,0	0,2	0,0	4,6	0,0	0,8
04-sep-17	1835	0,0	13,8	23,1	18,5	10,9	4,1	21,9	7,1	0,0	0,2	0,0	3,3	0,0	0,8
05-sep-17	379	0,0	0,0	0,0	27,3	17,6	6,3	21,9	12,3	0,0	0,2	0,0	6,0	0,0	0,8
06-sep-17	209	0,0	0,0	0,0	27,3	17,6	6,3	21,9	12,3	0,0	0,2	0,0	6,0	0,0	0,8
07-sep-17	239	0,0	0,0	0,0	27,3	17,6	6,3	21,9	12,3	0,0	0,2	0,0	6,0	0,0	0,8
09-sep-17	1381	0,0	0,0	0,0	27,3	17,6	6,3	21,9	12,3	0,0	0,2	0,0	6,0	0,0	0,8
10-sep-17	1300	0,0	26,7	11,1	19,5	9,7	6,0	21,9	6,3	0,0	0,2	0,0	3,2	0,6	0,8
11-sep-17	1589	0,0	7,7	15,1	20,7	12,6	8,3	21,9	9,1	0,0	0,2	0,0	4,5	0,0	0,8
12-sep-17	1798	0,0	0,9	0,3	28,2	15,7	10,4	21,9	11,8	0,0	0,2	0,0	6,2	0,0	0,8
13-sep-17	1800	0,0	0,4	0,2	0,0	20,9	15,4	21,9	18,0	0,0	0,2	0,0	10,3	0,1	0,8
14-sep-17	1804	0,0	0,1	0,0	28,4	17,0	9,4	21,9	10,4	0,0	0,2	0,0	4,8	0,0	0,8
15-sep-17	1817	0,0	13,5	27,2	16,4	9,9	5,9	21,9	6,6	0,0	0,2	0,0	3,1	0,0	0,8
16-sep-17	2072	0,0	4,6	2,8	29,6	17,3	5,5	21,9	10,6	0,0	0,2	0,0	4,9	0,0	0,8
17-sep-17	1722	0,0	23,1	7,4	21,4	12,5	4,5	21,9	9,0	0,0	0,2	0,0	4,4	0,0	0,8
19-sep-17	1925	0,0	0,1	0,1	29,0	18,5	5,4	21,9	9,8	0,0	0,2	0,0	4,3	0,0	0,8
20-sep-17	2007	0,0	21,0	3,5	22,3	13,3	4,7	21,9	8,4	0,0	0,2	0,0	3,9	0,0	0,8

28-sep-17	2215	0,0	1,3	0,6	26,1	15,7	10,1	21,9	12,9	0,0	0,2	0,0	6,9	0,0	0,8
29-sep-17	2210	0,0	21,2	14,6	17,0	10,2	6,7	21,9	8,5	0,0	0,2	0,0	4,6	0,0	0,8
01-oct-17	2205	0,0	28,8	6,6	17,6	10,4	6,4	21,9	7,2	0,0	0,2	0,0	3,6	0,0	0,8
15-oct-17	2448	0,0	1,0	0,3	26,6	15,5	9,6	21,9	10,5	0,0	0,2	0,0	5,3	0,2	0,8
18-oct-17	1998	0,0	1,1	0,3	27,6	15,9	9,8	21,9	11,0	0,0	0,2	0,0	5,5	0,0	0,8
23-oct-17	2075	0,0	23,9	12,5	24,5	8,4	5,8	21,9	6,3	0,0	0,2	0,0	3,3	0,0	0,8
18-nov-17	2156	0,0	23,1	23,0	26,2	3,4	3,8	21,9	2,8	0,0	0,2	0,0	1,6	0,1	0,8
21-nov-17	1302	0,0	56,8	13,3	22,5	1,4	1,0	21,9	1,0	0,0	0,2	0,0	0,6	0,2	0,8
26-nov-17	2117	0,0	11,1	2,8	21,9	13,5	11,2	21,9	9,0	0,0	0,2	0,0	4,6	0,1	0,8
27-nov-17	2130	0,0	23,5	9,1	21,0	9,9	8,1	21,9	6,2	0,0	0,2	0,0	3,0	0,1	0,8
28-nov-17	2197	0,0	34,0	4,6	18,4	9,7	7,8	21,9	5,9	0,0	0,2	0,0	2,9	0,0	0,8

Anexo E. Perfiles de temperatura y presión a lo largo de las torres T-2004 y T-4566 en los escenarios 2 y 3.

a. Perfil de temperatura y presión para las torres T-2004 y T-4566 en el escenario

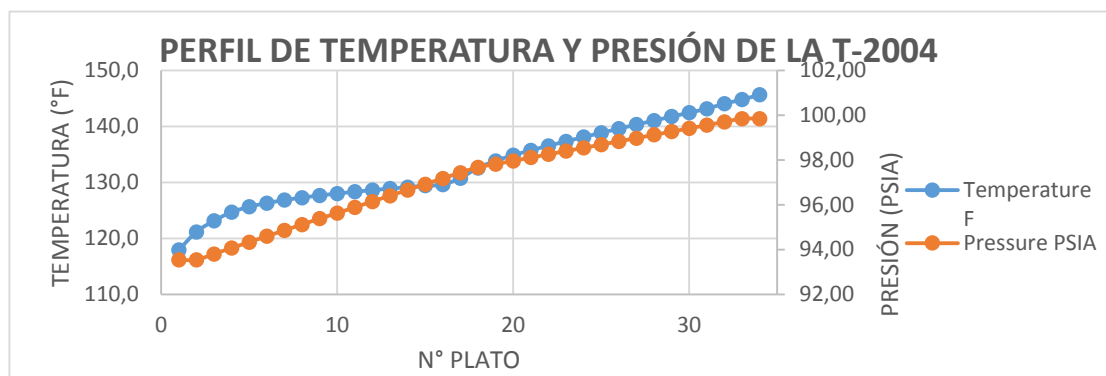


Figura E1. Gráfica del perfil de temperatura y presión en la T-2004 por platos en el escenario 2.

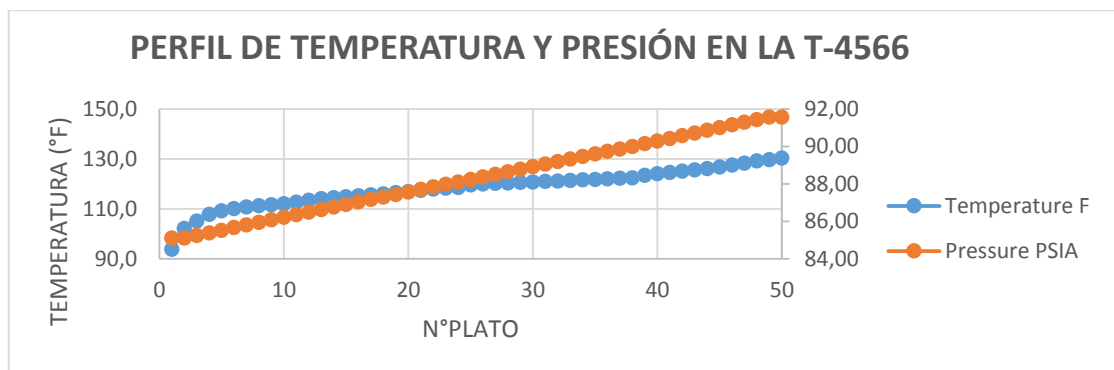


Figura E2. Gráfica del perfil de temperatura y presión en la T-4566 por platos en el escenario 2

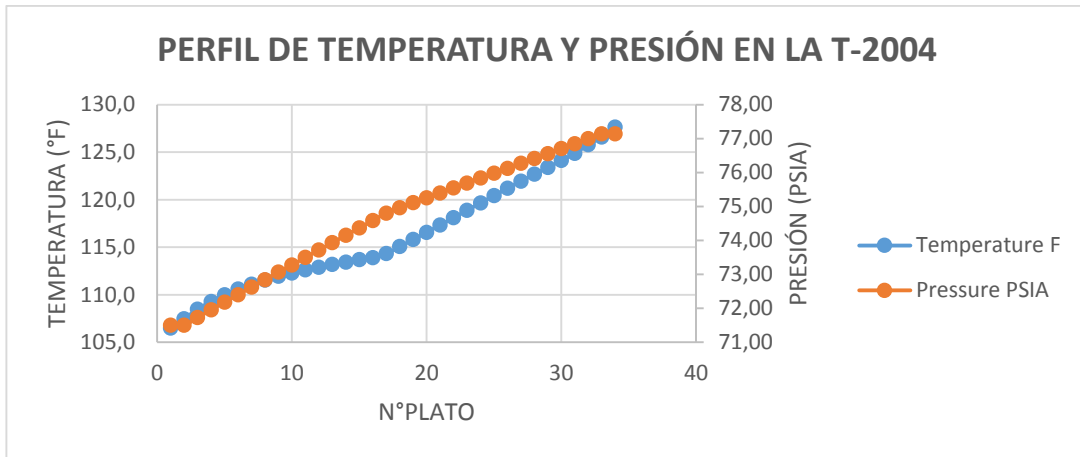


Figura E3. Gráfica del perfil de temperatura y presión en la T-2004 por platos en el escenario 2.

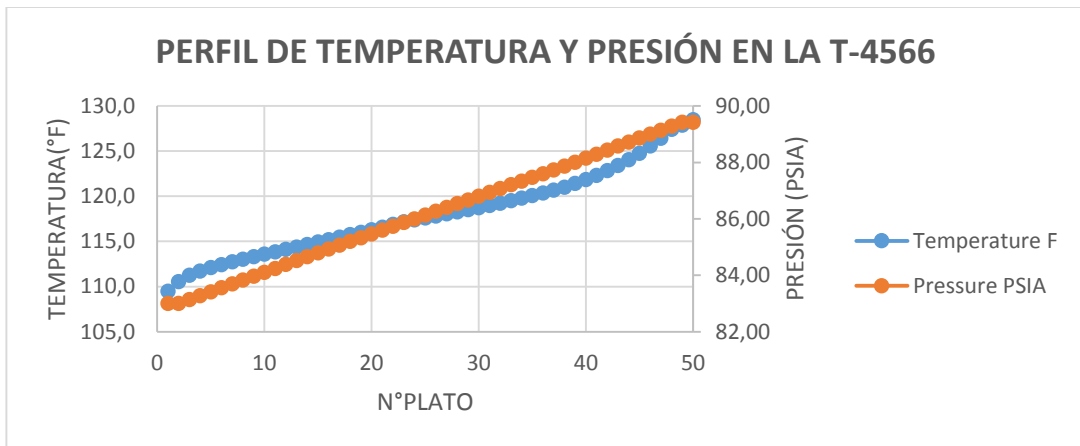


Figura E4. Gráfica del perfil de temperatura y presión en la T-4566 por platos en el escenario 3.

Anexo F. Tablas de análisis Anova

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
REAL	76	100740,3588	1325,531037	31383,15307		
SIMULACIÓN	76	100550,3553	1323,030991	27668,33585		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	237,5088284	1	237,5088284	0,008044127	0,928653958	3,904201877
Dentro de los grupos	4428661,669	150	29525,74446			
Total	4429099,178	151				
Prueba F para varianzas de dos muestras				Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	REAL	SIMULACIÓN		REAL	SIMULACIÓN	
Media	1325,531037	1323,030991	Media	1325,531037	1323,030991	
Varianza	31383,15307	27668,33585	Varianza	31383,15307	27668,33585	
Observaciones	76	76	Observaciones	76	76	
Grados de libertad	75	75	Diferencia hipotética de las medias	0		
F	1,134262402		Grados de libertad	149		
P(F<=f) una cola	0,293383776		Estadístico t	0,089689055		
Valor crítico para F (una cc)	1,465624596		P(T<t) una cola	0,46432738		
			Valor crítico de t (una cola)	1,655144534		
			P(T<t) dos colas	0,928654761		
			Valor crítico de t (dos colas)	1,976013178		
% ERROR MEDIA						
0,188607162						

Figura F1. Análisis para el flujo de Cima de la T-4566

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
REAL	76	2131,107971	28,04089435	98,39718843		
SIMULACIÓN	76	1626,90194	21,40660447	86,32398306		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1672,524484	1	1672,524484	18,10663877	3,66022E-05	3,904201877
Dentro de los grupos	13854,08786	150	92,36058574			
Total	15526,61235	151				
Prueba F para varianzas de dos muestras				Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	REAL	SIMULACIÓN		REAL	SIMULACIÓN	
Media	28,04089435	21,40660447	Media	28,04089435	21,40660447	
Varianza	98,39718843	86,32398306	Varianza	98,39718843	86,32398306	
Observaciones	76	76	Observaciones	76	76	
Grados de libertad	75	75	Diferencia hipotética de las medias	0		
F	1,139859225		Grados de libertad	149		
P(F<=f) una cola	0,286122859		Estadístico t	4,255424629		
Valor crítico para F (una cc)	1,465624596		P(T<t) una cola	1,83653E-05		
			Valor crítico de t (una cola)	1,655144534		
			P(T<t) dos colas	3,67305E-05		
			Valor crítico de t (dos colas)	1,976013178		
% ERROR MEDIA						
23,65933767						

Figura F2. Análisis para el %vol. de olefinas en la corriente de cima de la T-4566

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
REAL	76	4587,530022	60,36223713	61,09641601		
SIMULACIÓN	76	4384,598441	57,69208475	87,39108948		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	270,9291207	1	270,9291207	3,649184082	0,058004961	3,904201877
Dentro de los grupos	11136,56291	150	74,24375274			
Total	11407,49203	151				
Prueba F para varianzas de dos muestras				Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	REAL	SIMULACIÓN			REAL	SIMULACIÓN
Media	60,36223713	57,69208475		Media	60,36223713	57,69208475
Varianza	61,09641601	87,39108948		Varianza	61,09641601	87,39108948
Observaciones	76	76		Observaciones	76	76
Grados de libertad	75	75		Diferencia hipotética de las med	0	
F	0,699114937			Grados de libertad	145	
P(F<=f) una cola	0,061696319			Estadístico t	1,91028377	
Valor crítico para F (una cola)	0,68230296			P(T<=t) una cola	0,029035442	
				Valor crítico de t (una cola)	1,655430251	
				P(T<=t) dos colas	0,058070883	
				Valor crítico de t (dos colas)	1,979459363	
% ERROR MEDIA						
4,423547737						

Figura F3. Análisis para el %vol de isobutano en la corriente de cima de la T-4566

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
REAL	76	140346,0225	1846,684507	189373,368		
SIMULACIÓN	76	139443,5969	1782,152591	246804,4048		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	158245,9897	1	158245,9897	0,725603181	0,395670011	3,904201877
Dentro de los grupos	32713332,95	150	218088,8864			
Total	32871578,94	151				
Prueba F para varianzas de dos muestras				Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
	REAL	SIMULACIÓN			REAL	SIMULACIÓN
Media	1846,684507	1782,152591		Media	1846,684507	1782,152591
Varianza	189373,368	246804,4048		Varianza	189373,368	246804,4048
Observaciones	76	76		Observaciones	76	76
Grados de libertad	75	75		Diferencia hipotética de las medias	0	
F	0,767301411			Grados de libertad	147	
P(F<=f) una cola	0,126837292			Estadístico t	0,851823445	
Valor crítico para F (una cola)	0,68230296			P(T<=t) una cola	0,197848841	
				Valor crítico de t (una cola)	1,655285437	
				P(T<=t) dos colas	0,395697682	
				Valor crítico de t (dos colas)	1,976233309	
% ERROR MEDIA						
3,494474315						

Figura F4. Análisis para el flujo de fondo de la T-4566

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
	<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
REAL		76	5162,819999	67,9318421	28,28378116	
SIMULACIÓN		76	5290,54405	69,61242171	41,82610264	
ANÁLISIS DE VARIANZA						
	<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i> <i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos		107,3252179	1	107,3252179	3,061628748	0,08220628 3,904201877
Dentro de los grupos		5258,241286	150	35,0549419		
Total		5365,566504	151			
Prueba F para varianzas de dos muestras			Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales			
	<i>REAL</i>	<i>SIMULACIÓN</i>		<i>REAL</i>	<i>SIMULACIÓN</i>	
Media	67,9318421	69,61242171		67,9318421	69,61242171	
Varianza	28,28378116	41,82610264		28,28378116	41,82610264	
Observaciones	76	76		76	76	
Grados de libertad	75	75				
F	0,676223205			Diferencia hipotética de las medias	0	
P(F<=f) una cola	0,046175271			Grados de libertad	145	
Valor crítico para F (una cola)	0,68230296			Estadístico t	-1,74975105	
				P(T<=t) una cola	0,0411384	
				Valor crítico de t (una cola)	1,65543025	
				P(T<=t) dos colas	0,0822768	
				Valor crítico de t (dos colas)	1,97645956	
% ERROR MEDIA						
	2,473920274					

Figura F5. Análisis para el %vol de olefinas en la corriente de fondo de la T-4566

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
	<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>	
REAL		76	758,7699992	9,983815779	21,36488755	
SIMULACIÓN		76	930,9378	12,24918158	20,20886856	
ANÁLISIS DE VARIANZA						
	<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i> <i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos		195,011524	1	195,011524	9,381472458	0,00259886 3,904201877
Dentro de los grupos		3118,031708	150	20,78687805		
Total		3313,043232	151			
Prueba F para varianzas de dos muestras			Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales			
	<i>REAL</i>	<i>SIMULACIÓN</i>		<i>REAL</i>	<i>SIMULACIÓN</i>	
Media	9,983815779	12,24918158		9,98381578	12,24918158	
Varianza	21,36488755	20,20886856		21,3648875	20,20886856	
Observaciones	76	76		76	76	
Grados de libertad	75	75				
F	1,057203548			Diferencia hipotética de las medias	0	
P(F<=f) una cola	0,405143371			Grados de libertad	150	
Valor crítico para F (una cola)	1,465624596			Estadístico t	-1,06291894	
				P(T<=t) una cola	0,00129943	
				Valor crítico de t (una cola)	1,6550755	
				P(T<=t) dos colas	0,00259886	
				Valor crítico de t (dos colas)	1,97590533	
% ERROR MEDIA						
	22,69038062					

Figura F6. Análisis para el %vol de isobutano en la corriente de fondo de la T-4566

Anexo G. Codificación de los tres casos de optimización

Las variables tomadas para la optimización fueron la relación de reflujo y el calor suministrado por el rehedidor. En el primer caso se realizó con el reflujo como variable con intervalo de mínimo y máximo entre 5 y 12, debido a que este reflujo es muy variable según la relación de datos históricos (Reflujo /Destilado) con valores alrededor de este rango. Para el segundo escenario se estableció el calor del rehedidor con un mínimo de 9 y máximo 20 MMBTU/h restringido por el diseño. En el tercer escenario se usaron las dos variables con los mismos rangos de operación para apreciar el efecto que generaban en la optimización.

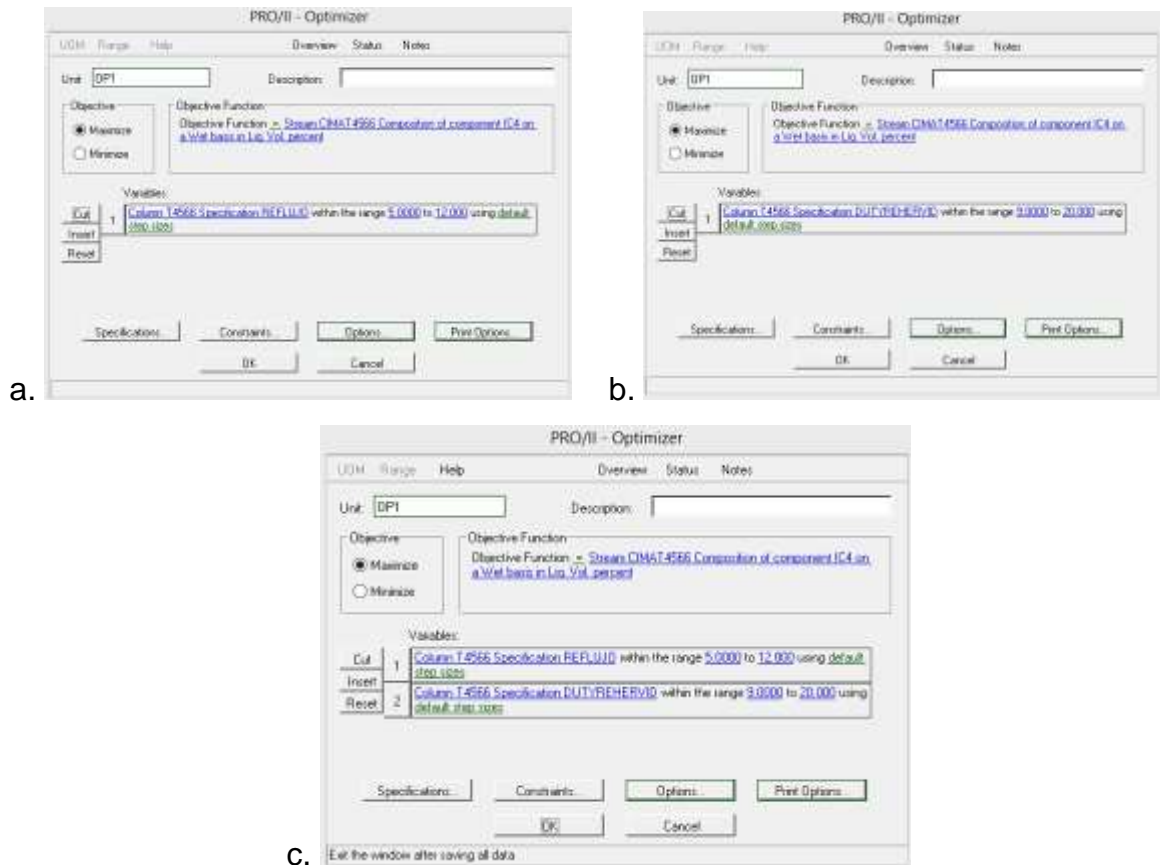


Figura G1. Especificación del optimizador usado en PRO II con las variables y restricciones en las mismas para los tres casos. a) con reflujo como variable b) con calor del rehedidor como variable c) con las dos variables.

Anexo H. Resultados de los tres casos de optimización para los tres escenarios de carga.

Tabla H1. Resultados de optimización del primer escenario

	OPTIMIZACIÓN PRIMER ESCENARIO			
	SIMULACIÓN	VARIABLE 1	VARIABLE 2	CON 2 VARIABLES
FLUJO CIMA T-4566	1510	1054	1441	1010
ETANO	0,00	0,00	0,00	0,00
PROPANO	0,14	0,21	0,15	0,21
PROPILENO	0,04	0,06	0,04	0,06
ISO-BUTANO	64,49	76,05	67,58	79,37
1-BUTENO	11,25	7,06	9,98	5,89
N-BUTANO	0,47	0,18	0,30	0,13
ISO-BUTILENO	23,08	16,21	21,57	14,16
TRAN-2 BUTENO	0,31	0,12	0,20	0,08
CIS-2-BUTENO	0,04	0,01	0,02	0,01
C5 Y MÁS PESADOS	0,00	0,00	0,00	0,00
1_3 BUTADIENO	0,19	0,10	0,15	0,08
OLEFINAS TOTAL	34,86	23,51	31,92	20,22
FLUJO FONDO T-4566	1932	2388	2001	2431
ETANO	0,00	0,00	0,00	0,00
PROPANO	0,00	0,00	0,00	0,00
PROPILENO	0,00	0,00	0,00	0,00
ISO-BUTANO	8,89	14,39	8,59	14,13
1-BUTENO	17,34	18,02	18,04	18,31
N-BUTANO	22,69	18,58	22,05	18,27
ISO-BUTILENO	22,40	25,56	23,50	26,24
TRAN-2 BUTENO	18,49	15,11	17,94	14,85
CIS-2-BUTENO	9,34	7,57	9,03	7,44
C5 Y MÁS PESADOS	0,21	0,17	0,20	0,16
1_3 BUTADIENO	0,48	0,46	0,50	0,46
OLEFINAS TOTAL	68,04	66,72	69,01	67,30

DUTY REHERVIDOR (MM BTU/d)	17,80	17,80	20,00	20,00
----------------------------	-------	-------	-------	-------

Tabla H2. Resultados de optimización del segundo escenario

	OPTIMIZACIÓN SEGUNDO ESCENARIO			
	SIMULACIÓN	VARIABLE 1	VARIABLE 2	CON 2 VARIABLES
FLUJO CIMA T-4566	1331	1179	1282	1144
ETANO	0,00	0,00	0,00	0,00
PROPANO	13,24	14,94	13,74	15,39
PROPILENO	4,51	5,09	4,68	5,25
ISO-BUTANO	60,78	63,16	63,06	65,08
1-BUTENO	6,67	5,06	5,59	4,18
N-BUTANO	0,47	0,33	0,32	0,23
ISO-BUTILENO	13,99	11,19	12,39	9,66
TRASN-2 BUTENO	0,24	0,16	0,16	0,11
CIS-2-BUTENO	0,05	0,03	0,03	0,02
C5 Y MÁS PESADOS	0,00	0,00	0,00	0,00
1_3 BUTADIENO	0,05	0,03	0,04	0,03
OLEFINAS TOTAL	21,00	16,48	18,20	14,00
FLUJO FONDO T-4566	2035	2187	2083	2222
ETANO	0,00	0,00	0,00	0,00
PROPANO	0,00	0,00	0,00	0,00
PROPILENO	0,00	0,00	0,00	0,00
ISO-BUTANO	12,55	14,60	12,26	14,37
1-BUTENO	18,15	18,22	18,55	18,47
N-BUTANO	19,07	17,86	18,73	17,63
ISO-BUTILENO	23,05	23,94	23,83	24,51
TRASN-2 BUTENO	17,90	16,72	17,54	16,48
CIS-2-BUTENO	8,69	8,10	8,50	7,98
C5 Y MÁS PESADOS	0,07	0,07	0,00	0,00
1_3 BUTADIENO	0,36	0,35	0,36	0,35

OLEFINAS TOTAL	68,16	67,33	68,79	67,79
DUTY REHERVIDOR (MMBTU/d)	17,80	17,80	20,00	20,00

Tabla H3. Resultados de optimización del tercer escenario

	OPTIMIZACIÓN TERCER ESCENARIO			
	SIMULACIÓN	VARIABLE 1	VARIABLE 2	CON 2 VARIABLES
FLUJO CIMA T-4566	1351	944	1304	918
ETANO	0,00	0,00	0,00	0,00
PROPANO	0,69	0,99	0,72	1,02
PROPILENO	0,68	0,97	0,70	1,00
ISO-BUTANO	69,39	81,77	71,84	84,10
1-BUTENO	9,92	4,89	8,78	4,05
N-BUTANO	0,25	0,10	0,17	0,07
ISO-BUTILENO	18,90	11,21	17,67	9,71
TRASN-2 BUTENO	0,14	0,05	0,09	0,04
CIS-2-BUTENO	0,02	0,01	0,01	0,01
C5 Y MÁS PESADOS	0,00	0,00	0,00	0,00
1_3 BUTADIENO	0,01	0,01	0,01	0,01
OLEFINAS TOTAL	28,99	16,17	26,57	13,81
FLUJO FONDO T-4566	1367	1774	1414	1800
ETANO	0,00	0,00	0,00	0,00
PROPANO	0,00	0,00	0,00	0,00
PROPILENO	0,00	0,00	0,00	0,00
ISO-BUTANO	12,09	18,64	11,70	18,37
1-BUTENO	19,85	20,25	20,58	20,46
N-BUTANO	19,85	15,44	19,29	15,23
ISO-BUTILENO	22,81	26,00	23,82	26,55
TRASN-2 BUTENO	18,41	14,27	17,86	14,07
CIS-2-BUTENO	6,88	5,32	6,66	5,24
C5 Y MÁS PESADOS	0,05	0,04	0,05	0,04

1_3 BUTADIENO	0,04	0,04	0,04	0,04
OLEFINAS TOTAL	68,00	65,88	68,96	66,36
DUTY REHERVIDOR (MMBTU/d)	17,80	17,80	20,00	20,00