

Evaluación técnico-económica de estrategias de aumento de producción de nafta e hidrógeno en
la planta de aromáticos de la gerencia refinería Barrancabermeja

Ingrid Natalia Ramírez Acosta

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniera Química

Director

Giovanni Morales Medina

Dr. Ingeniero químico.

Co director

Miguel Ángel Aguirre Reina

Ingeniero de sistemas, MSc.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A Dios por guiarme en todo momento y permitirme culminar con éxito mi carrera profesional, por darme y darles salud a los míos para celebrar juntos.

A mi familia en especial mis padres, Sandra Acosta y Benigno Ramírez, quienes con su perseverancia y cariño motivaron mi vida para alcanzar este gran logro. A mi hermano Juan Pablo y mi abuela Luz Marina que son motivación extra para seguir logrando mis sueños. A mis amigos en especial, Michael Castaño, Valentina Osorio por su inimaginable compañía y comprensión brindada a lo largo de estos años para alcanzar esta meta.

A Camilo Calderón, por todos los momentos de felicidad, por ser mi polo a tierra, mi consejero. Conocerte es de las cosas lindas que me deja la universidad.

A la universidad y compañeros, quienes con sus enseñanzas y experiencias me han proporcionado las herramientas para mi formación profesional.

A todas las personas que en este largo caminar me enseñaron a dar desinteresadamente y ver que todo tiene sentido cuando se trabaja con pasión, amor y tolerancia.

Agradecimientos

La autora de este documento reconoce y agradece por su compromiso, dedicación e influencia en la consecución de este objetivo de vida a:

La Universidad Industrial de Santander

Giovanni Medina Morales, director.

Lina Afanador, secretaria escuela de ingeniería química.

Al departamento de petroquímica, Camilo Rincón, Mario Jaramillo, Manuel Ardila, Edwin Pava, Edward Moscoso, Arley Guerrero, Fredy Jurado y en especial Miguel Ángel Aguirre, tutor asignado.

A mis compañeras practicantes, Jinneth, Daniela y nuestra gran consejera Yorleth.

Ecopetrol

Contenido

	Pág.
Introducción.....	12
1. Descripción de la Empresa	13
2. Marco Teórico.....	14
2.1 Hidrocarburos aromáticos.....	14
2.2 Planta aromáticos Gerencia Refinería de Barrancabermeja	15
2.2.1 U-1300.....	16
2.2.1.1 Pre fraccionamiento.....	16
2.2.1.2 Unifining.....	17
2.2.1.3 Platforming.....	17
2.2.2 Unidad U1400 Sulfolane	18
2.2.3 Unidad U1500 Fraccionamiento	19
2.2.4 Unidad U1600 Hydeal	19
2.2.5 Unidad U1700 Hydrar	20
2.3 Aprovechamiento de los aromáticos en la calidad de los combustibles.....	20
3. Objetivos.....	22
3.1 Objetivo General	22
3.2 Objetivos Específicos	22
4. Alcance	23

5. Descripción Metodológica.....	23
5.1 Fase 1: Fase exploratoria de operación	24
5.1.1 Datos históricos de operación	24
5.1.2 Rendimientos esperados de los productos de interés	25
5.1.3 Determinación de cuellos de botella	25
5.2 Fase 2: Definición de las alternativas recomendadas de operación	25
5.2.1 Disponibilidad de materia prima para operar a cargas mayores	25
5.2.2 Definición de los valores adecuados de condiciones de operación.....	25
5.2.3 Programación para instalación de los reactores de la U-1700	26
5.3 Fase 3: Desarrollo del estudio.....	26
5.3.1 Estudio de operación de la columna de extracción T-1401	26
5.3.2 Estudio de operación U-1500.....	26
5.3.3 Estudio de operación de la columna para producción de o-xileno T-1504	27
6. Análisis de Resultados.....	27
6.1 Capacidad y calidad de la carga procesada.....	27
6.2 Alternativas de procesamiento de corrientes aromáticas.....	31
6.3 Evaluación de restricciones para incremento de producción.....	32
6.3.1 Estudio columna extracción T-1401.....	33
6.3.1.1 Porcentaje de extracción de aromáticos.....	35
6.3.2 Estudio U-1500 fraccionamiento	37
6.3.2.1 Porcentaje de benceno en carga a U-1500.	37
6.3.3 Estudio torre separadora T-1504.....	40
6.3.3.1 Estimación de beneficios T-1504.....	43

6.3.4 Plan operación reactores Hydrar	44
6.4 Aspectos económicos torre separadora T-1504	46
6.5 Rendimientos esperados de los productos de interés	50
7. Conclusiones	51
8. Recomendaciones.....	52
Referencias Bibliográficas.....	54
Apéndices	56

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama proceso de producción planta Aromáticos.	16
Figura 2. Esquema generalizado de reacción de Platforming.	18
Figura 3. Diagrama general de la unidad de fraccionamiento de Aromáticos.	19
Figura 4. Reacciones de hidrodealquilación en Hydeal.	20
Figura 5. Metodología empleada para el desarrollo de la iniciativa de trabajo.	24
Figura 6. Causalidad shutdown unidades de Aromáticos 2018 (%).	30
Figura 7. Causalidad shutdown unidades de Aromáticos 2019 (%).	31
Figura 8. Carga anual (2001-2020) vs máximo % extracción T-1401.	36
Figura 9. Carga U-1500 vs % benceno (2011-2020) (*).	39
Figura 10. Carga U-1500 vs % benceno (año 2013).	39
Figura 11. Plan para la operación de los reactores R-1701/02/03 en la U-1700 hydrar.	45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Cargas confiables de las unidades de la planta de aromáticos.	28
Tabla 2. Factor de servicio de las unidades del complejo Aromático (2018 y 2019).	29
Tabla 3. Cargas evaluadas en la unidad U-1400 Sulfolane.	33
Tabla 4. Máximos valores de extracción T1401, por año.	35
Tabla 5. Máximos valores de operación U-1500, por año.	38
Tabla 6. Condiciones de operación (3 de noviembre de 2019) vs control para T-1504.	41
Tabla 7. Pronóstico de rendimientos a carga máxima confiable U-1700 Hydrar.	45
Tabla 8. Términos de ejecución de las actividades.	46
Tabla 9. Propuesta económica.	47
Tabla 10. Margen histórico o-xileno venta nacional.	47
Tabla 11. Proyección margen o-xileno venta nacional.	48
Tabla 12. Margen histórico xileno venta internacional.	49
Tabla 13. Proyección margen xileno venta internacional.	49
Tabla 14. Corriente producto, con destino hacia el pool de gasolina de la GRB.	50
Tabla 15. Identificación productos de interés.	51

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A Principales inconvenientes detectados para alcanzar incremento de la extracción de aromáticos en la T-1401.	56
Apéndice B Carga máxima U-1400.	57
Apéndice C Condiciones de operación solvente Sulfolane.	59
Apéndice D. Datos (típicos) de operación T-1401.	60
Apéndice E Valores de operación corrida (Julio- agosto, 2019), obteniendo máximo porcentaje de extracción.	61
Apéndice F Escenarios de operación U-1500 fraccionamiento.	62
Apéndice G Torre de destilación T-1504.	64
Apéndice H. “Tapped out”	66
Apéndice I Producción o-xileno año 2018.	67
Apéndice J Producción o-xileno año 2019.	68
Apéndice K Producción o-xileno año 2020.	69
Apéndice L Procedimiento de cargue del catalizador H ₃	70
Apéndice M Arranque y corrida operacional a máxima carga de Hydrar U-1700.	72
Apéndice N Condiciones de servicio para ejecución de trabajos T-1504.	78
Apéndice O Balance volumétrico planta Aromáticos.	80
Apéndice P Resumen rendimientos máximos de las unidades de la planta de aromáticos de la GRB.	81

Resumen

Título: Evaluación técnico-económica de estrategias de aumento de producción de nafta e hidrógeno en la planta de aromáticos de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja*

Autor: Ingrid Natalia Ramírez Acosta**

Palabras Clave: Aromáticos, pool de gasolina, estudio técnico, platformado, datos históricos.

Descripción:

La planta de aromáticos de ECOPETROL S.A fue diseñada para producir aromáticos de alta pureza mediante la utilización de cinco unidades de proceso; que hacen posible la transformación de la nafta virgen de bajo octanaje en una serie de subproductos y productos de tipo no aromático y aromático respectivamente.

En este proyecto se llevó a cabo un análisis de los parámetros más importantes en las unidades (especialmente U-1400, U-1500 y U-1700) del complejo de aromáticos con el fin de aumentar la capacidad de procesamiento a una mayor recuperación de aromáticos y conocer los requerimientos para la producción de corrientes de alto octano y bajo azufre al pool de gasolina de la GRB y de esta manera contribuir a la iniciativa de avanzar con la producción de combustibles más limpios para el país.

Finalmente, el desarrollo de este estudio técnico establece las bases para realizar futuras mejoras (optimización de las condiciones de operación, aumento de carga y posibles rediseños), sin embargo, se evidencia que el complejo de aromáticos se encuentra preparado para producir sin mayores limitaciones 6672 bpd de los principales grupos de corrientes como NHT, refinato, platformado, extracto, CHEX, toluenos, xilenos y C9+, para el pool de gasolina de la GRB. Este estudio fue validado, mediante datos históricos e información del diseño del proceso.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Giovanni Morales Medina Dr. Ingeniero químico. Co director Miguel Ángel Aguirre Reina Ingeniero de sistemas, MSc.

Abstract

Title: Technical-economic evaluation of strategies to increase the production of naphtha and hydrogen in the aromatic plant of the management of the Barrancabermeja refinery*

Author: Ingrid Natalia Ramírez Acosta**

Keywords: Aromatics, gasoline pool, technical study, platforming, historical data.

Description:

ECOPETROL S.A.'s aromatics plant was designed to produce high purity aromatics through the use of five process units; which make possible the transformation of low octane virgin naphtha into a series of by-products and non-aromatic and aromatic type products respectively.

In this project, an analysis of the most important parameters in the units (especially U-1300, U-1400 and U-1500) of the aromatics complex was carried out in order to increase the processing capacity to a higher recovery of aromatics and to know the requirements for the production of high octane and low sulfur streams to the gasoline pool of the GRB and in this way contribute to the initiative to advance with the production of cleaner fuels for the country.

Finally, the development of this technical study establishes the basis for future improvements (optimization of operating conditions, increase in load and possible redesign). However, it is evident that the aromatics complex is prepared to produce without major limitations the main groups of streams such as NHT, raffinate, platforming, extract, CHEX, toluene, xylenes and C9+, for the gasoline pool of the GRB. This study was validated, using historical data and information from the process design.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director Giovanni Morales Medina Dr. Ingeniero químico. Co director Miguel Ángel Aguirre Reina Ingeniero de sistemas, MSc.

Introducción

En Colombia, los hidrocarburos aromáticos son materias primas de importancia para la industria petroquímica. La planta de Aromáticos de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB) de Ecopetrol S.A. es la responsable de asegurar la demanda y el consumo de estas sustancias al igual que la producción de aromáticos de alta pureza, mediante la utilización de cinco unidades de proceso. Estas unidades hacen posible la transformación de la nafta virgen de bajo octanaje en una serie de subproductos y productos de tipo no aromático y aromático respectivamente.

Dentro de las unidades que integran la planta de aromáticos se encuentran tres procesos catalíticos (Unifining, Platforming y Hydrar), que han sido desarrollados y mejorados en su técnica de operación. Adicionalmente, se cuenta con un proceso de extracción líquido-líquido llamado Sulfolane, un proceso de hidrodealquilación térmica y un proceso de fraccionamiento de aromáticos. Por otro lado, la carga de diseño a la planta es de 10553 bpd de Nafta Virgen (Ecopetrol S.A., 2004).

Desde el año 2000, para la recuperación de la unidad de reformado catalítico de la planta de Aromáticos en la GRB se han llevado a cabo diversos proyectos, cuyos principales objetivos han considerado la recuperación de la confiabilidad de los reactores de reformado catalítico y el incremento de la producción de gasolinas de alto octanaje (alto contenido de aromáticos). Sin embargo, debido a que los requisitos de calidad de la gasolina limitan el contenido de aromáticos, no ha sido posible el cumplimiento del incremento en la producción de gasolina y en el octanaje de la misma.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, el presente proyecto contempló diversas alternativas de incremento de la producción de nafta reformada. Entre estas alternativas se analizaron el montaje de nuevas facilidades y equipos de acondicionamiento en las unidades de Fraccionamiento y Hydrar para el envío de excedentes de nafta hidrotratada al sistema de mezcla de gasolina comercial. Este análisis contribuye con los hitos de la GRB referentes al aumento de la oferta de gasolinas con características comerciales (Ecopetrol S.A., 2020).

1. Descripción de la Empresa

Ecopetrol S.A. es la empresa más grande del país, con una utilidad neta acumulada de COP 9.2 billones en 2019. Por su tamaño, Ecopetrol pertenece al grupo de las 40 petroleras más grandes del mundo y es una de las cuatro principales de su tipo en América latina. Su objeto social es el desarrollo de actividades comerciales o industriales correspondientes o relacionadas con la exploración, explotación, refinación, transporte, almacenamiento, distribución y comercialización de hidrocarburos, sus derivados y productos (Ecopetrol S.A., 2014). Cuenta con campos de extracción de hidrocarburos en el centro, sur, oriente y norte de Colombia, cuatro refinerías (Barrancabermeja, Cartagena, Orito y Apiay) encargadas de suplir la producción nacional de combustibles permitiendo atender la demanda del país y la salida de productos de exportación. Adicionalmente, Ecopetrol cuenta con puertos para exportación e importación de combustibles y crudos en ambas costas, una red de transporte de 8.500 km de oleoductos y poliductos que cubren

toda el área geográfica del país, conectando los sistemas de producción con los grandes centros de consumo y los terminales marítimos.

la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB), tiene una capacidad instalada de refinación de 250 kbpd con índices de conversión entre el 85%-88% (Ecopetrol S.A. , 2019). En ella operan un total de 52 unidades en la que destaca la planta de aromáticos que se encarga de producir aromáticos como el benceno, cumeno, xileno, ortoxileno y tolueno, los cuales se utilizan para el consumo de los mercados nacionales e internacionales. Estos productos son utilizados en la fabricación de diluyentes y disolventes, fibras, detergentes, pinturas, tinturas, plaguicidas, abonos, aislantes y medicamentos, entre otros.

2. Marco Teórico

2.1 Hidrocarburos aromáticos

En la industria petroquímica, el benceno, el tolueno y los xilenos son designados como hidrocarburos aromáticos BTX. Son aquellos hidrocarburos que poseen propiedades especiales asociadas con el núcleo o anillo del benceno y sus derivados formados básicamente por benceno, tolueno, xileno, ortoxileno y cumeno, en el cual hay seis grupos de carbono-hidrógeno unidos a cada uno de los vértices de un hexágono. Los enlaces que unen estos seis grupos al anillo presentan características intermedias, respecto a su comportamiento, entre los enlaces simples y dobles. Así, aunque el benceno puede reaccionar para formar productos de adición, como el ciclohexano, la

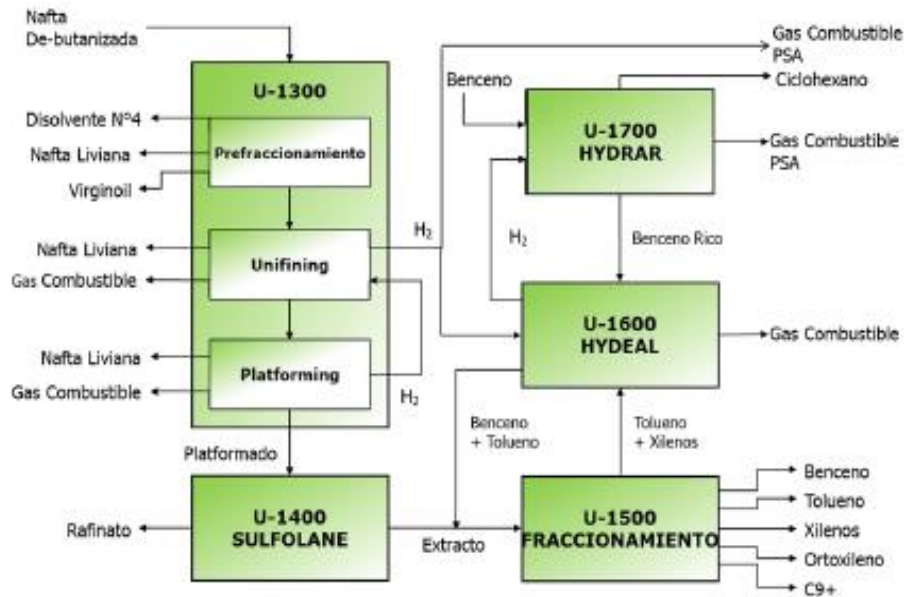
reacción característica de este no es una reacción de adición, sino de sustitución, en la cual el hidrógeno es reemplazado por otro sustituto, ya sea un elemento univalente o un grupo (Stellman, Osinsky, & Markkanen, 2000).

2.2 Planta aromáticos Gerencia Refinería de Barrancabermeja

En 1967, surge el proyecto de construcción de la planta Aromáticos debido a la expansión de la capacidad de carga de la refinería de Barrancabermeja y la creciente demanda del país por productos petroquímicos. En ella se producen actualmente aromáticos de alta pureza mediante la transformación de la nafta virgen de bajo octanaje: los productos de la planta son benceno, tolueno, xilenos (p-xileno y m-xileno), ciclohexano, nafta pesada (virgin oil), aromáticos pesados (cumenos, C9+) y subproductos de tipo no aromático (Ecopetrol S.A. , 2015). La planta Aromáticos cuenta con cinco unidades de proceso las cuales cumplen procesos simultáneos; dentro de estas unidades se encuentra la unidad de reformado (U-1300), unidad de extracción líquido-líquido (U-1400), unidad de fraccionamiento de aromáticos (U-1500), unidad de hidrodealquilación térmica (U-1600) y unidad de hidrogenación catalítica (U-1700) como se muestra en la Figura 1.

Figura 1.

Diagrama proceso de producción planta Aromáticos.



Nota. Tomado de: Ecopetrol. (s.f.) *Manual de proceso planta de Aromáticos*.

2.2.1 U-1300

Es la primera unidad de proceso de la planta de aromáticos de la GRB, la cual está compuesta por 3 unidades de procesamiento (prefraccionamiento, platforming y unifining).

2.2.1.1 Pre fraccionamiento. Es un proceso que permite seleccionar la nafta para dejar un corte donde se encuentran los precursores de la formación de los compuestos aromáticos (C_6 , C_7 , C_8 y C_9), Para ello, se lleva a cabo un proceso de destilación, fraccionando la nafta debutanizada en los siguientes tres cortes (Ecopetrol S.A., 2015).

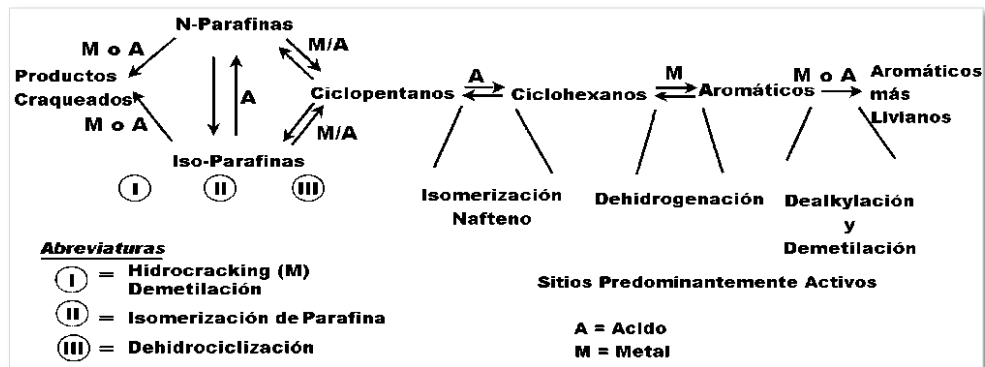
- **Nafta Liviana:** Es el corte liviano de la nafta debutanizada, rico en pentanos, se envía a gasolina. Para evitar daños ocasionados por los compuestos livianos de azufre, se agrega un inhibidor de corrosión.
- **Carga a Unifining:** es el corte corazón o del medio de la nafta debutanizada, es de interés para la producción de los aromáticos.
- **Nafta Pesada:** es el corte pesado y en ella se obtiene como productos el Disolvente No.4 o Varsol, producto de fondo, y una nafta liviana, producto de cima, alineada comúnmente a gasolina motor (Rodríguez Arévalo, 2020).

2.2.1.2 Unifining. Es un proceso de descontaminación de la nafta a través de una hidrogenación catalítica. Los contaminantes son compuestos de azufre, organometálicos, oxigenados y nitrogenados (Lopez, 2014).

2.2.1.3 Platforming. Es el proceso de formación de los compuestos aromáticos que consiste en convertir las cadenas parafínicas (alargadas) y nafténicas (cíclicas con enlace sencillo) en compuestos aromáticos, utilizando un agente catalizador (Ecopetrol S.A. , 2015). Estas reacciones ocurren en serie y en paralelo entre sí, formando el esquema de reacción general que se indica en la Figura 2.

Figura 2.

Esquema generalizado de reacción de Platforming.



Nota. Tomado de: Ecopetrol. (s.f.) Manual de descripción de procesos U-1300.

2.2.2 Unidad U1400 Sulfolane

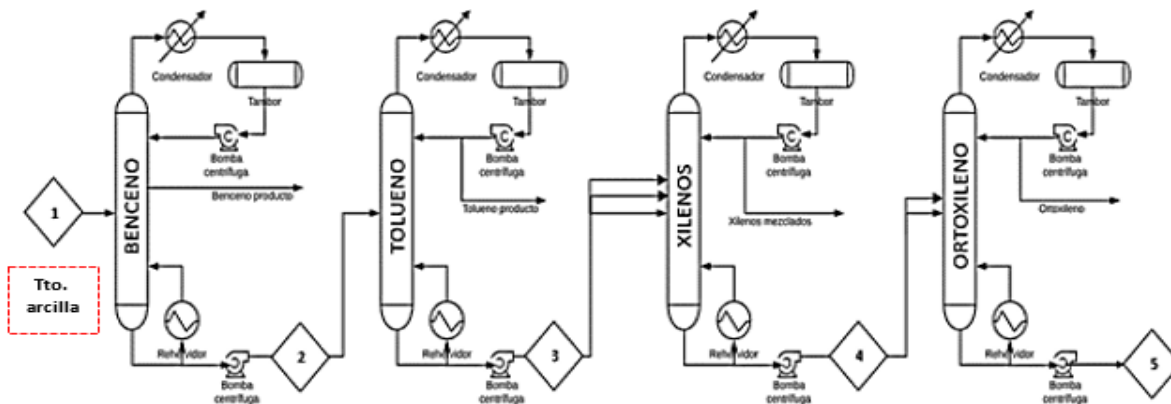
Es un proceso de extracción líquido-líquido que se hace a la corriente de salida de platformado, para la separación de la parte de los aromáticos (extracto) de los no aromáticos (refinado), utilizando un solvente llamado Sulfolane (Ecopetrol S.A. , 2015). La extracción en U-1400 está centrada en la separación física de compuestos aromáticos (C₆-C₈), generando una corriente adecuada para el reformado catalítico. Adicionalmente, gracias al equilibrio que se alcanza entre las propiedades primarias (selectividad) y secundarias (punto de ebullición, densidad) del solvente, se logra la adecuada separación de aromáticos y no aromáticos de la carga extractora (Ardila, 2017).

2.2.3 Unidad U1500 Fraccionamiento

Es un proceso de Fraccionamiento del extracto aromático, realizando una separación por destilación en orden creciente de peso molecular y de acuerdo al punto de ebullición. Como método previo a la destilación, se realiza un proceso de adsorción para eliminar olefinas y parafinas, debido a que estos compuestos al ser oxidados pueden alterar el color de los productos (Benceno, Tolueno, Xilenos, O-xilenos y aromáticos más pesados C₉+). El esquema general de la unidad U1500 se muestra en la Figura 3.

Figura 3.

Diagrama general de la unidad de fraccionamiento de Aromáticos.



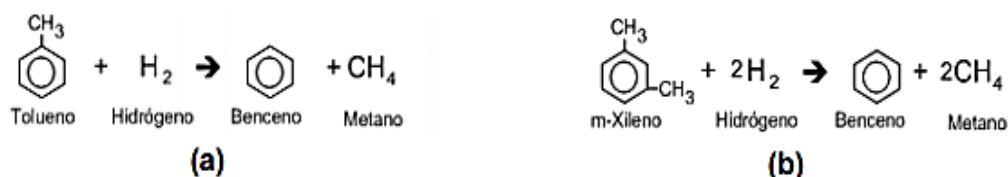
Nota. Tomado de: Ecopetrol S.A.

2.2.4 Unidad U1600 Hydeal

Consiste en un proceso de hidrodealquilación térmica de tolueno para la producción de benceno con un 60-65% de conversión. Las principales reacciones llevadas a cabo en la unidad son representadas en la Figura 4.

Figura 4.

Reacciones de hidrodealquilación en Hydeal.



Nota. Tomado de: Ecopetrol S.A.

2.2.5 Unidad U1700 Hydrar

Es un proceso de conversión de benceno en ciclohexano a través de hidrogenación catalítica. La reacción es efectuada en tres reactores catalíticos en presencia de hidrógeno, empleando un catalizador a base de platino (Ecopetrol S.A. , 2015).

2.3 Aprovechamiento de los aromáticos en la calidad de los combustibles

La gasolina y el diésel pueden contener de azufre y nitrógeno en cantidades tales que al ser quemados ocasionan contaminación atmosférica, favoreciendo a la formación de lluvias ácidas (Arango, 2009). Asimismo, estos la quema de estos combustibles genera material particulado, los cuales impactan en problemas de salud pública y contribuyen al cambio climático. En las ciudades colombianas, en especial Medellín y Bogotá, la baja calidad del aire es causa recurrente de morbilidad y mortalidad (Ecopetrol S.A., 2020). Es por esto, que el CONPES 3943 ha planteado una disminución progresiva de los niveles de azufre, tanto en la gasolina como en el diésel que son comercializados en Colombia. Conforme a este CONPES, Ecopetrol ha desarrollado iniciativas tendientes a la mejora en sus combustibles comerciales. Una de las iniciativas corresponde al

análisis de la viabilidad en el aumento de la producción de corrientes de bajo azufre y alto octano en la planta Aromáticos (reformado, extracto, tolueno y xilenos); estas corrientes son dirigidas al sistema de mezcla de combustible comercial. Este análisis de viabilidad debe iniciar con la identificación de las posibles restricciones operacionales que puedan limitar la producción de las corrientes disponibles para la mezcla de combustibles comerciales. Por esto, la pregunta que direccionó la práctica correspondió a ¿cuáles estrategias pueden ser implementadas para el aumento en la generación de corrientes producto de la planta Aromáticos, teniendo en cuenta el desempeño actual de las unidades que la conforman?

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar la viabilidad operacional y los aspectos económicos de alternativas para la ampliación de la capacidad de producción de nafta en la planta de aromáticos de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB).

3.2 Objetivos Específicos

- ♦ Identificar diferentes cuellos de botella en la producción de la planta Aromáticos, por medio de la comparación de los históricos de proceso con predicciones en operación según diseño.
- ♦ Evaluar alternativas que contribuyan al aumento de la producción de nafta e hidrógeno en la planta Aromáticos, manteniendo la calidad en las corrientes de productos.
- ♦ Definir los aspectos económicos de la alternativa con mayor viabilidad técnica en el incremento de la producción de las unidades que dispone la planta de aromáticos de la GRB.

4. Alcance

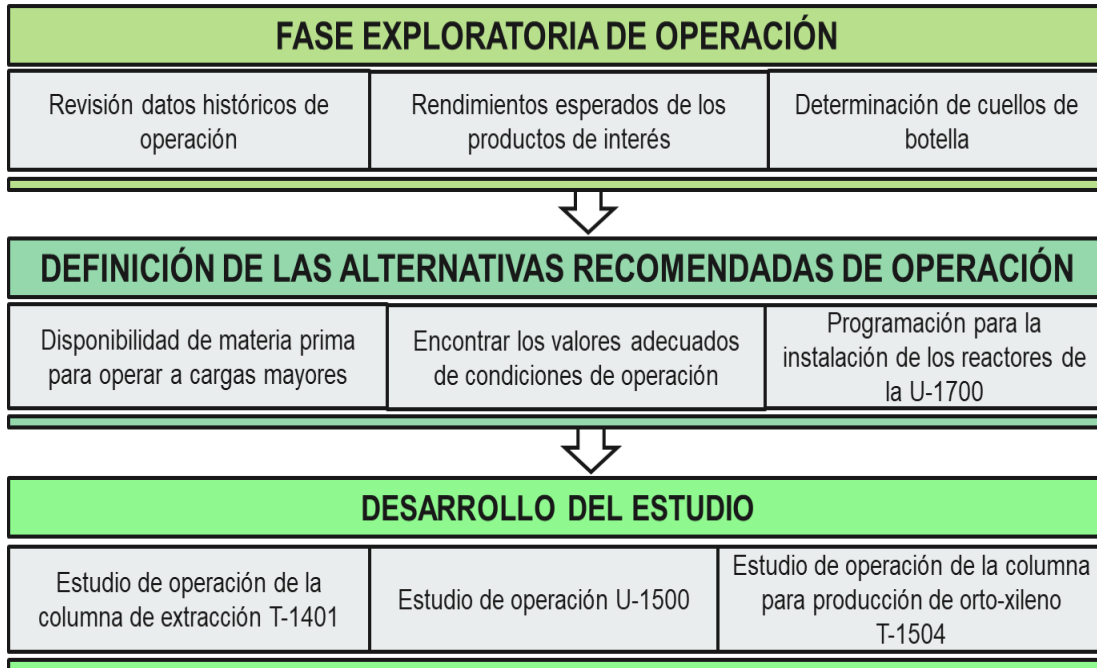
Realizar una evaluación correspondiente del proceso actual llevado a cabo en la planta Aromáticos de la GRB, definiendo estrategias que incrementen la producción de corrientes de alto octano, control de benceno y bajo azufre en las corrientes que se envíen a mezcla para gasolina comercial.

5. Descripción Metodológica

En la Figura 5 se presenta la ruta metodológica usada para la elaboración del presente proyecto de grado. La práctica empresarial que enmarca el desarrollo del proyecto fue ejecutada durante los meses de enero a julio del 2020.

Figura 5.

Metodología empleada para el desarrollo de la iniciativa de trabajo.



5.1 Fase 1: Fase exploratoria de operación

5.1.1 Datos históricos de operación

Los datos históricos de la planta Aromáticos, fueron descargados a través del software PIDataLink. Los datos descargados contenían valores diarios de producción (flujo) de los últimos 2 años de las corrientes involucradas.

5.1.2 Rendimientos esperados de los productos de interés

Teniendo en cuenta las cargas según diseño de las unidades de aromáticos y las cargas máximas confiables (extraídas del software especializado PIDataLink) se pronosticaron los rendimientos de las diferentes unidades de la planta de aromáticos.

5.1.3 Determinación de cuellos de botella

En esta sección se identificaron los diferentes cuellos de botella del proceso de producción en las unidades del complejo de aromáticos. Para esto, se analizaron las corrientes de cargue y salida, las composiciones, entre otras variables operacionales.

5.2 Fase 2: Definición de las alternativas recomendadas de operación

5.2.1 Disponibilidad de materia prima para operar a cargas mayores

Se Realizó una revisión y evaluación en acompañamiento del departamento de planeación, de alternativas que seguramente podrían liberar nafta para enviar hacia la planta de aromáticos.

5.2.2 Definición de los valores adecuados de condiciones de operación

Se recolectaron los datos para el caso base y/o de diseño, y los datos para el caso actual con la información disponible en los dos últimos años, de las unidades de la planta Aromáticos.

Para esto se utilizaron las fuentes de información disponibles en planta para la captura de datos como: monitoreo en líneas de flujo, cromatografías y variables de operación.

5.2.3 Programación para instalación de los reactores de la U-1700

En esta etapa se desarrolló el plan para la operación de los reactores SR-1701/02/03 en la U-1700 Hydrar, donde se presentan los tiempos de plan para la operación de los reactores a partir del estado actual del proceso de reposición de los equipos. Estos equipos se encuentran en el proceso de certificación de calidad de la fabricación por los entes autorizados.

5.3 Fase 3: Desarrollo del estudio

5.3.1 Estudio de operación de la columna de extracción T-1401

La columna de extracción T-1401 fue analizada, definiendo los parámetros que aseguran la conformidad del proceso tanto en cantidad, como en calidad del producto extraído.

5.3.2 Estudio de operación U-1500

Se revisó el comportamiento histórico de la U-1500 y se definió el mejor caso o modelo de operación con respecto a la concentración de benceno. Como variable diferenciadora para la selección de los casos, se consideraron las composiciones de la carga a la unidad U-1500.

5.3.3 Estudio de operación de la columna para producción de o-xileno T-1504

En esta sección se llevó a cabo la evaluación de condiciones de operación a partir de los datos disponibles en campo, DCS y diseño de la torre T-1504, determinando las causas de pérdida de capacidad de destilación de O-xileno en la U-1500 fraccionamiento.

6. Análisis de Resultados

6.1 Capacidad y calidad de la carga procesada

El seguimiento a las condiciones de operación y las composiciones de las corrientes de salida se realizó por medio de la herramienta PI GRB. Esta base de datos históricos de la planta Aromáticos representa la operación para los años 2018 y 2019, y fueron analizadas diversas variables de proceso para determinar su influencia en la producción de corrientes de alto octano al pool de gasolina de la GRB.

Las variables que constituyeron la base de datos fueron cargas máximas confiables, relación solvente/carga, porcentajes de extracción aromática, contenido de benceno y contenido de C₉₊. Finalmente, los históricos fueron depurados, eliminando un estimado de 870 muestras asociadas al bajo desempeño de las unidades del complejo aromáticos. Las principales causas de bajo desempeño fueron: paradas de planta no programadas de las unidades, fallas por instrumentación, disturbios operacionales y lectura de datos atípicos reportados por el programa.

La Tabla 1 resume las principales características de las cargas contenidas en la base de históricos y según diseño. Los datos de esta tabla permiten la identificación de las condiciones de operación efectivas y la capacidad utilizada de cada unidad. La capacidad utilizada, revela que tan cerca se encuentran las unidades al mejor punto de operación; es decir, es la razón entre el nivel de operación actual de la unidad (carga promedio año 2019) y el mejor nivel de operación de la unidad (carga diseño). Según la comparación de los flujos en la Tabla 1, se observa que para la unidad sulfolane y la unidad de Fraccionamiento, los valores de carga máxima confiable se encuentran fuera del rango del valor de diseño. Esta condición representa limitaciones para cumplir con el incremento de corrientes dirigidas al sistema de mezcla de gasolinas de la GRB. Asimismo, la capacidad utilizada de la unidad Hydeal es nula debido a que se encuentra fuera de servicio desde el año 2006, donde reportó para ese mismo año una máxima carga de 800 bpd. Por otro lado, la unidad Hydrar reportó baja carga procesada en el año 2019 debido a que fue puesta fuera de servicio para el mismo año a causa de la no disponibilidad mecánica de los reactores R-1701/02/03.

Tabla 1.

Cargas confiables de las unidades de la planta de aromáticos.

Unidad	Cargas diseño (BPD)	Cargas máximas confiables (BPD)	Cargas promedio año 2019 (BPD)	Capacidad Utilizada (%)
U-1300 Prefraccionamiento	16550	15826	10445	63
U-1300 Unifining	9600	9500	6991	73
U-1300 Platforming	9500	9500	6988	74
U-1400 Sulfolane	4737	5000	4709	99
U-1500 Fraccionamiento	3050	3600	2775	91
U-1600 Hydeal	1050	800	0	0
U-1700 Hydrar	527	550	63	12

Por su parte, la Tabla 2 presenta el factor de servicio de las unidades en el año 2018 y 2019. El factor de servicio evalúa el rendimiento y la disponibilidad de cada unidad durante el periodo de los históricos; con base en este factor es posible definir acciones que conlleven a la mejora en la productividad de la planta. Según la Tabla 2, en el año 2019 se evidencia una reducción del factor de servicio en la sección de Unifining y Platforming de la U-1300. Esto se debe al incremento en los días de parada no programada por el evento de falla del horno H-1307 y un evento que originó un escape de H₂ durante la etapa de regeneración del catalizador de Platforming.

Tabla 2.

Factor de servicio de las unidades del complejo Aromático (2018 y 2019).

Unidad	Factor de Servicio 2018	Factor de Servicio 2019
U-1300 Prefraccionamiento	1,00	1,00
U-1300 Unifining	1,00	0,96
U-1300 Platforming	1,00	0,96
U-1400 Sulfolane	0,99	0,99
U-1500 Fraccionamiento	0,99	0,99
U-1600 Hydeal	0,00	0,00
U-1700 Hydrar	0,02	0,02

De igual manera, las Figuras 6 y 7 presentan la distribución porcentual de la causalidad de los días fuera de servicio de las unidades para los años 2018 y 2019 respectivamente. Según estas figuras, el funcionamiento inadecuado de los equipos referidos condujo al desarrollo de problemas operacionales que disminuyeron la eficiencia de los procesos de producción. Las condiciones operacionales inadecuadas desencadenan problemas de arrastre, inundación, lloriqueo, fugas, ensuciamiento en líneas de carga, contaminación de solvente, entre otros. De acuerdo con esto, a

continuación, se presentan los equipos que ocasionaron eventos de días de parada no programada y su respectiva falla:

- E1401A-B/T1401/T1402/T1403/T1404/T1405: Altas velocidades de corrosión en U1400 específicamente en sistema de cima por degradación de solvente generando lodos que ocasionan ensuciamiento severo acumulado en intercambiadores E1401A/B, E1403, E1404, E1405 A/B, E1406, E1407, E1408A/B; torres T1401, T1402, T1403, T1404, T1405.
- Carga U1500: Disminución de carga a fraccionamiento por ensuciamiento de línea de carga y fondo T1501A/B a E1501.
- Baja producción de *orto*-xileno: Debido a una operación deficiente de la T1504, asociada a un alto nivel del fondo de la torre lo cual incrementa la caída de presión a través de la torre, impidiendo la separación de fases. La hipótesis más probable es por desprendimiento parcial de algunos platos del fondo de la torre.

Figura 6.

Causalidad shutdown unidades de Aromáticos 2018 (%).

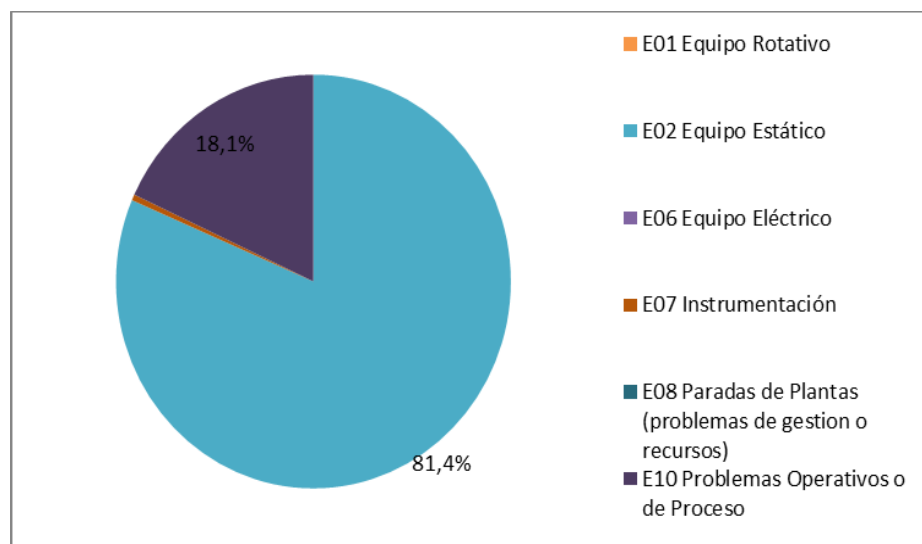
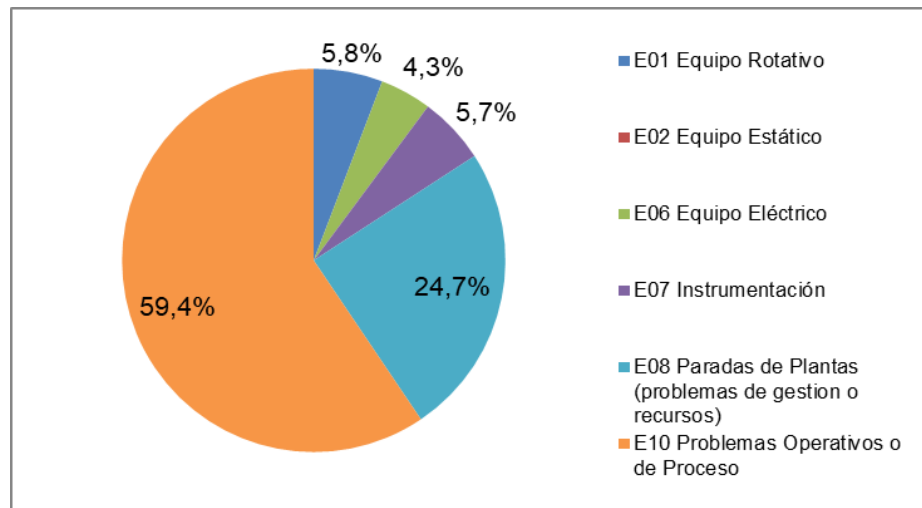


Figura 7.

Causalidad shutdown unidades de Aromáticos 2019 (%).



6.2 Alternativas de procesamiento de corrientes aromáticas

Teniendo en cuenta que es posible generar mayores beneficios para la producción de aromáticos, la primera iniciativa plantea la producción de 3550 bpd de nafta de bajo azufre como componente de preparación de gasolina motor (menor a 50 ppm), mediante carga excedente a U1300 Pre-fraccionamiento – Unifining. Asimismo, se plantea un aumento de carga a Platforming para el incremento de flujo de H₂ hacia HDT. Sin embargo, los procedimientos propuestos deben garantizar premisas como:

- Aseguramiento nulo de las variaciones en la calidad de la nafta de carga.
- Aseguramiento de la mínima inversión para su ejecución.
- Disponibilidad completa de materia prima para la producción.
- Incremento en los desvíos de nafta pesada para la producción de componentes:

reformado, extracto, tolueno y xilenos. Esta última, mediante el perfeccionamiento de U-1500.

Adicionalmente, dos alternativas, control del arrastre de sulfolane en el refinato, y la operación de U1700 Hydrar para la producción de 650 bpd de ciclohexano, fueron consideradas para el envío de corrientes de alto octano y bajo azufre al sistema de mezcla de gasolinas. En el mismo orden, las premisas a garantizar fueron: el mantenimiento de la operación de la T-1401 y la evaluación de la instalación de los reactores R-1701/02/03. Realizando un balance de ventajas y desventajas, se sugirió que las alternativas anteriormente mencionadas fueran desarrolladas de manera conjunta.

6.3 Evaluación de restricciones para incremento de producción

Las restricciones o cuellos de botella se refieren a aquellas actividades que disminuyen el flujo del proceso, incrementando los tiempos de espera y reduciendo la productividad del sistema. Como consecuencia, los cuellos de botella generan un aumento en los costos del proceso y una disminución en los ingresos. Por tal motivo, estos cuellos son considerados limitantes para los procesos productivos y aunque se clasifican en varios grupos, en la mayoría de plantas procesadoras los cuellos de botella son limitados por los equipos. Para el caso de estudio se detectaron como cuellos de botella la torre extractora T-1401 de la unidad U-1400, la torre separadora T-1504 de la U-1500 (ver Apéndice A), y la operación de los reactores Hydrar.

Adicional a estos equipos, se realizó un estudio a la U-1500 con el fin de asegurar la operación de la unidad, en base a la necesidad de obtener una mayor concentración de benceno. Dicha necesidad surgió como consecuencia de que esta corriente de benceno representa la corriente de carga a la U-1700, que mediante el uso de los reactores Hydrar, es transformada a una corriente

de ciclohexano; esta corriente es posteriormente enviada al sistema de mezcla de gasolinas de la GRB, contribuyendo a la mejora del índice de octanaje en la gasolina comercial.

6.3.1 Estudio columna extracción T-1401

Se revisó el comportamiento histórico de la U-1400, tomando como referencia valores de carga a la unidad, entre 4500 bpd y 5500 bpd, con sus respectivos valores de circulación de solvente. A su vez, se identificó la carga máxima obtenida, operando en forma estable la torre extractora T1401 y estableciendo la relación solvente/carga; en esta relación la unidad puede operar de manera adecuada, asegurando los parámetros de calidad del extracto y refinato. Cabe mencionar que la relación solvente/carga recomendada para la unidad 1400 Sulfolane es 2:1. Para establecer un mejor análisis del comportamiento de la ST1401 se calculó la extracción obtenida, con base en los flujos registrados de salida de refinato, medido a la entrada y a la salida de la torre T1402. La Tabla 3 resume estos datos.

Tabla 3.

Cargas evaluadas en la unidad U-1400 Sulfolane.

Descripción	Carga evaluada (BPD)	% Extracción
Carga a torre T-1401	3500-5500	-
Solvente a T-1402	8000-12000	-
Salida refinato T-1402	-	54-63

Finalmente, fue necesario el cálculo del porcentaje de extracción máximo obtenido en la unidad (ver Apéndice B), identificando hasta donde se podía incrementar el rendimiento de refinato y extracto. Según esto, es necesario que la torre extractora opere de tal manera que salga

la cantidad mínima posible de compuestos no aromáticos con la corriente de solvente rico, ya que en la medida que esta aumente, la corriente de producto será de menor calidad (concentración de aromáticos) y afectará la operación de las unidades corriente abajo. Actualmente, el límite de calidad establecido en la corriente es de 1500 ppm de Aromáticos en el extracto producto de la Unidad.

Por lo anterior, la mayor carga obtenida en la unidad correspondió a 5000 bpd, lo cual conlleva a la calidad requerida en el extracto producto y al límite máximo de benceno exigido en el refinado producto. Con este valor de carga, se esperan menores valores de extracción, en detrimento de la recuperación de C_{9+} aromáticos que se perderían con la corriente de refinado. Según el uso de este refinado, debe validarse posteriormente la conveniencia o no del incremento de esta corriente.

El rango de operación (normal) de la U1400 de carga se encuentra en valores oscilantes entre 4500-5500 bpd. Donde, si se trabaja con flujos mayores a 5500 bpd, se reduce el tiempo de contacto entre el solvente y el Platformado, resultando en extracción baja y en rendimiento bajo de extracto. Para el caso contrario, es decir, si se trabaja con flujos menores a 4500 bpd se puede generar un daño en los equipos de bombeo.

Similarmente, la operación de la unidad U-1400 debe considerar el rango de presión de la torre extractora entre los valores 62-68 psig. Un incremento en la presión fuera de estos límites ocasionaría sobrepresión del equipo, impidiendo la llegada de solvente pobre. Por el contrario, si la presión es menor, se evidenciaría una extracción baja y posible pérdida de la interface de la T-1401. Como concepto básico, la extracción mejora con menores temperaturas y mayores presiones. Como soporte a lo desarrollado en esta sección, en el (Apéndice C) se indican las especificaciones de sulfolane usado para la extracción en la U-1400, y en el (Apéndice D) se presentan los datos

promedio de las corrientes de proceso de la torre T-1401 correspondientes a los promedios históricos descargados (Manuel, 2017, p.68).

6.3.1.1 Porcentaje de extracción de aromáticos. Debido a los antecedentes presentados de la T-1401 ante la ausencia de sus discos rotatorios y la reducción en la extracción de productos a causa de los incrementos en los flujos de carga y con el fin de asegurar que no ocurra lo mismo al poner en marcha la iniciativa planteada. Se establece en esta sección el rango de operación normal de la T-1401. Este rango operacional asegura el tiempo de contacto adecuado entre el solvente y el Platformado, reflejando alta extracción y alto rendimiento de extracto, y evita posibles daños en los equipos de bombeo.

Teniendo en cuenta el propósito de la sección de extracción que es separar los hidrocarburos no aromáticos, materiales parafínicos y nafténicos livianos de los hidrocarburos aromáticos, benceno, tolueno, xilenos y aromáticos pesados, se representa en la Tabla 4 el máximo porcentaje de extracción (por extracto) obtenido, cada año, siendo el 22 de julio del 2019 el máximo valor reportado de extracción con un valor de 61,95%.

Tabla 4.

Máximos valores de extracción T1401, por año.

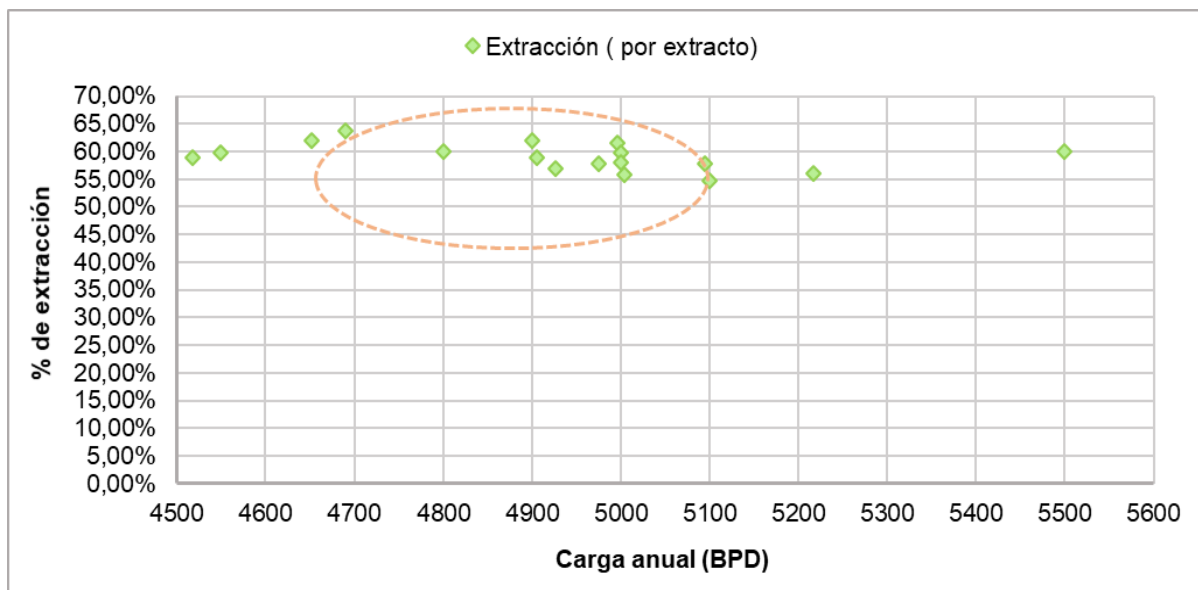
Año	% Extracción	Carga
2001	54,75%	5100
2002	59,92%	5500
2003	59,70%	5000
2004	57,85%	5094,48
2007	55,99%	5216,47
2008	57,99%	5000
2009	59,94%	4800,63
2010	58,98%	4517,70

Año	% Extracción	Carga
2011	61,92%	4899,85
2012	58,94%	4905,59
2014	61,56%	4996,71
2015	57,87%	4974,60
2016	56,97%	4926,59
2017	59,83%	4548,86
2018	55,89%	5004,44
2019	61,95%	4652,52

A continuación, en la Figura 8 se destaca la operación con cargas en rangos entre 4600-5100 bpd para el alcance de altos porcentajes de extracción. Adicionalmente, para la carga máxima reportada a la U1400 se estima un porcentaje de extracción superior al 53%.

Figura 8.

Carga anual (2001-2020) vs máximo % extracción T-1401.



6.3.2 Estudio U-1500 fraccionamiento

La composición de la carga a la unidad U-1500 se ve modificada según sea su modo de operación, y este cambio de la composición afecta el valor máximo de carga que puede establecerse, sin afectar la calidad de los productos. Según la información histórica suministrada, se establece que son tres los escenarios de operación para la unidad, los cuales se muestran de manera detallada en el (Apéndice F). Estos escenarios, representan así los modos de operación de la Unidad, según sean los requerimientos del mercado, las necesidades de producción y consumo interno de productos aromáticos y la disponibilidad de crudos de carga a la refinería (materia prima).

Este trabajo se enfocó en analizar el comportamiento en la unidad para el caso de operación 2, ya que se ajusta a los requerimientos de la iniciativa. Sin embargo, existen limitaciones a la hora de operar la unidad de fraccionamiento U-1500 mediante el caso 2. Las dos limitaciones identificadas fueron:

- Porcentaje de benceno en la carga a la U1500: en términos generales, un mayor contenido de benceno permite mayor volumen de carga a la unidad, encontrándose valores históricos de hasta 25% de benceno con una carga a U1500 de 3600 bpd.
- Porcentaje de C₉₊ en carga a la U1500: en términos generales, la carga a la T-1504 no debe superar el 32% de contenido de C₉₊ para evitar condiciones de operación críticas en ST1504 o incumplimiento de calidad en los productos.

6.3.2.1 Porcentaje de benceno en carga a U-1500. Los valores máximos de carga a la U1500, según históricos, con su respectivo porcentaje de composición de benceno, se presentan

en la Tabla 5. Si bien es lógico suponer un mayor volumen de carga disponible a la unidad U-1500 cuando está en operación la U-1600, puesto que puede tomarse como carga el producto de esta última junto a su carga típica, extracto de la U-1400, también es cierto que un mayor contenido de benceno permite incrementar la carga hasta valores de 3600 bpd, impactando solamente la T-1502, que permite esta carga y mantiene operación dentro de diseño de todas las torres y cumplimiento de las especificaciones. Expresado de otro modo, operar con 3600 bpd de carga a la unidad con valores bajos de benceno (10%), sin la operación de la U-1600, obliga a la operación de las torres con una carga un 20% por encima del valor típico de operación, dificultando el control y la obtención de productos en especificaciones. Gráficamente se puede apreciar este comportamiento en la Figura 9, que representa los máximos volúmenes de carga obtenidos, frente a su composición de benceno en el periodo 2011 a 2020. Igualmente, en la Figura 10 se representan los máximos volúmenes de carga, frente a su composición de benceno para el año 2013, cuando se tuvo una carga mínima de 2600 bpd y una máxima de 3600 bpd.

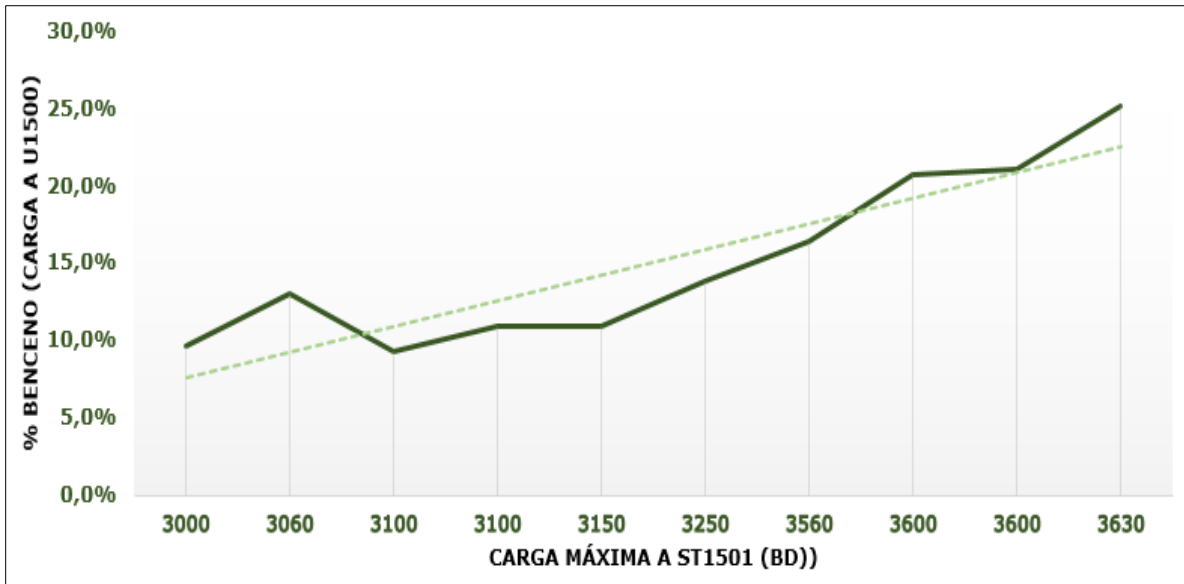
Tabla 5.

Máximos valores de operación U-1500, por año.

	Carga BPD	Benceno %
2011	3600	20,7%
2012	3630	25,1%
2013	3600	21,1%
2014	3060	13,0%
2015	3560	16,4%
2016	3250	13,9%
2017	3100	10,9%
2018	3100	9,2%
2019	3150	10,9%
2020	3000	9,6%

Figura 9.

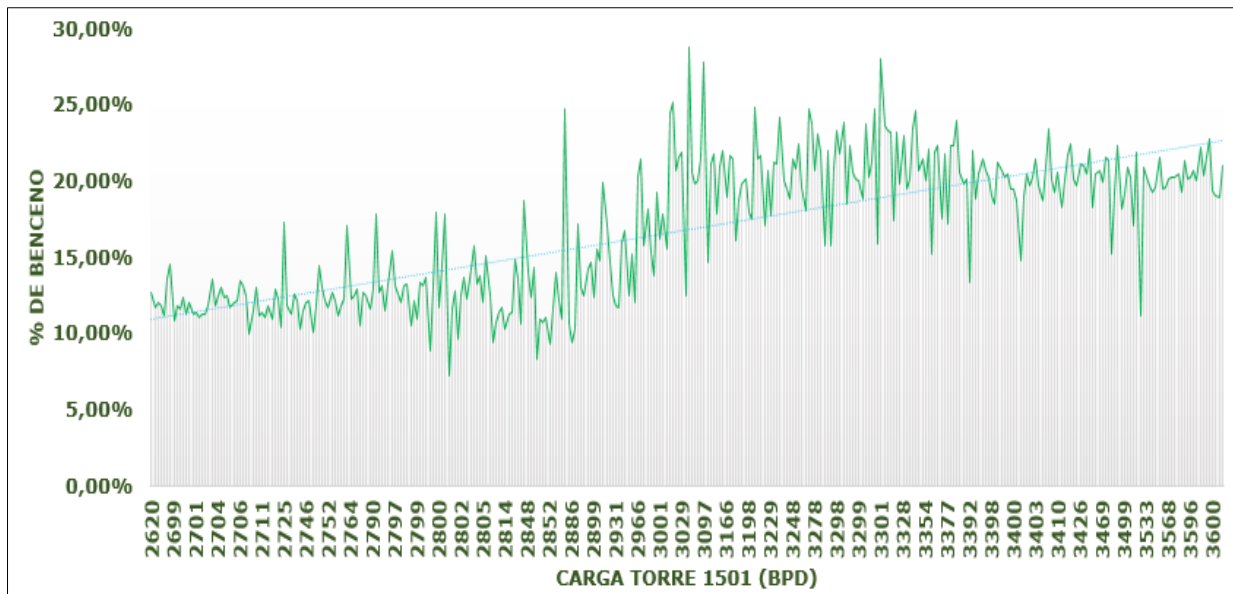
Carga U-1500 vs % benceno (2011-2020) ().*



Nota. (*) Ordenado por valor, no cronológicamente.

Figura 10.

Carga U-1500 vs % benceno (año 2013).



Del análisis de los históricos se puede establecer que la capacidad máxima de carga a la unidad U1500 corresponde a 3600 bpd. Sin embargo, esta capacidad máxima se reporta con una operación simultánea de la U-1600. Esto se debe a dos razones principales:

- La U-1600 generan por lo menos 700 bpd de carga adicional.
- La composición de la U-1600 presenta un bajo contenido de C9+ y más del doble de contenido de benceno. Esto genera mayor carga a la T1502 (que no se ve afectada en su operación).

6.3.3 Estudio torre separadora T-1504

Esta columna, consta de 120 platos y cuenta con facilidades para alimentar la carga desde los platos N° 51, N° 61 o N° 71. Los vapores de Xilenos mezclados y etilbenceno que se generan por la cima de la T-1504 son condensados como producto de cima y acumulados en el tambor D-1503. El fondo de la T-1504 es dirigido a la rectificadora de *o*-xileno T-1505. Un mayor detalle de la operación de la T-1504 es presentado en el Apéndice G.

Se analizó en campo el funcionamiento operacional de esta torre, lo que condujo a la identificación de goteo de líquido desde la toma superior del LGR-1514. Esta condición hace referencia a un fenómeno denominado “*tapped out*”, el cual manifiesta que el nivel real de líquido dentro de la torre es mayor que el presentado en el indicador local de vidrio (LGR) (Lieberman & Lieberman, 2014). El Apéndice H ilustra este fenómeno “*tapped out*”. En la Tabla 6, se presentan las condiciones operacionales reportadas el día del evento (3 de noviembre de 2019) vs las condiciones esperadas en control de la torre T-1504. Según esta tabla, es posible evidenciar la pérdida de eficiencia de destilación de la torre T-1504 que afecta la producción de O-xileno hasta

en un 30% menos a la esperada después de la puesta en servicio del día posterior a la ejecución de la Parada General de la Planta Aromáticos 2019 (3 de noviembre).

Tabla 6.

Condiciones de operación (3 de noviembre de 2019) vs control para T-1504.

Parámetro	Unidad	03-Nov	Control
Flujo de carga	BPD	1280	1300
Flujo Producto de cima M-P Xileno	BPD	976	900
Flujo Producto de fondo O-xileno+ Aromáticos Pesados	BPD	520	400
Flujo Reflujo	BPD	3850	5500
Temperatura cima	°F	285	285
Temperatura de entrada Rehervidor de fondo E1509	°F	374	360
Temperatura de salida Rehervidor de fondo E1509	°F	375	365
Presión de fondo	psig	15	10
Nivel de cima	%	50	50
Nivel de fondo	%	50	50
Pérdidas de O-xileno en M-P xileno Cromatógrafo en línea CR-1502	% volumen	17	10
Flujo O-xileno producto cima T-1505	BPD	95	130
Contenido M-P xileno en O-xileno producto Cromatógrafo en línea CR-1505	ppm	10000	17000
Presión de succión P-1507 A/B	psig	18	14

Con el perfil de presión de la Torre T-1504, y la presión de succión de la P-1507 bomba de fondo de la T-1504 se puede establecer que una cabeza adicional de 4 psig equivalente a 4 metros de líquido, conduce a una presión de succión de 14 psig, según la fórmula de altura de columna de líquido:

$$\Delta H = \frac{2,31 \times 0,3048 \times \Delta P}{S. G.} \quad \text{Ecuación 1}$$

ΔH = Altura de columna líquida en metros (m)

ΔP = Diferencial de presión en lb/pulg² (psig)

S.G. = Gravedad específica del líquido para este caso 0,702

Respecto a la caída de presión de los platos según diseño debería ser aproximadamente 11 psig, equivalentes 8 m de columna de líquido. La presión de fondo indicó 14,5 psig equivalentes a 11,53 m, que corresponden a las mismas 4 psig adicionales de presión de succión en la P-1507.

Además, según PI&D EF-363 la altura al piso a la toma superior del LGR-1514 de fondo de la T-1504 sería aproximadamente 7 metros, y la altura equivalente de la presión de succión de la P-1507 de 18 psig es 18 metros, lo cual estaría 11 metros (por encima) de los cuales se descuentan 8 metros de caída de presión de diseño de la T-1504, indicaría entonces 3 metros adicionales de columna de líquido. concluyéndose que el nivel de líquido en el fondo de la torre se encuentra posiblemente 4 metros aproximadamente por encima de la toma superior del LT-1513 y LGR-1514 y razón por la cual se presenta baja eficiencia de la torre por alto nivel de líquido de fondo. Por consiguiente, los reportes indicaron que fue necesario llevar a cabo un tipo de acciones para la mitigación del problema:

- Control de alto nivel de la T-1504 con la reducción de reflujo actual. Para esto, se realizó la desocupación real del fondo de la T-1504.
- Mantenimiento de la toma del LT-1513 y LGR-1514.
- Inspección de internos mediante la técnica de Gamma Scanner para la verificación de la condición de inundación (*Flooding*).
- Estimación del costo preliminar para el desmontaje e instalación de los platos afectados del fondo de la torre de xileno T-1504 con su respectivo análisis técnico económico que soporte la inversión (se suponen 10 platos).

6.3.3.1 Estimación de beneficios T-1504. Luego de hacer un análisis histórico de producción de *o*-xileno con diferentes valores de carga en la unidad de fraccionamiento, correspondientes a la producción entre los años 2018, 2019 y 2020 se concluye que:

- De acuerdo con el análisis (ver Apéndice I), durante la operación de la unidad 1500 en el año 2018, año que se produjo de manera continua sin ninguna interrupción en el ciclo de operación, con una carga promedio de 2833 bpd se obtiene una producción promedio de *o*-xileno de 139,4 bpd.

- De acuerdo con el análisis de la imagen (ver Apéndice J), durante la operación de la unidad en el año 2019, año en el que se interrumpe la operación de la unidad en el mes de agosto para la T/A, con una carga promedio de 2847 bpd se obtiene una producción promedio de *O*-xileno de 123 bpd, lo que evidencia ya una pérdida de eficiencia de la torre.

- De acuerdo con el análisis de la imagen (ver Apéndice K), en la que se analiza la operación de la unidad luego de la T/A del año 2019, y hasta la fecha actual, con una carga promedio de 2837 bpd se obtiene una producción promedio de *o*-xileno de 107 bpd, acentuándose mucho más la pérdida de eficiencia de la columna, además de un comportamiento atípico de las variables de operación de la torre lo que genera una mayor atención del personal de operaciones para garantizar las condiciones de calidad y volumen del producto, sin lograr alcanza los niveles de producción deseados.

Se estima que, en promedio la columna tiene una pérdida de eficiencia que representa la no producción de 17 bpd de *o*-xileno y que se incrementa después de la parada T/A en 16 bpd más, con un delta total de 33 bpd en el periodo. Esto conduce a que los beneficios esperados de acuerdo con los análisis históricos de producción de *o*-xileno de la planta, serian 33 bpd de producción adicional de *o*-xileno de acuerdo con los niveles de producción actuales.

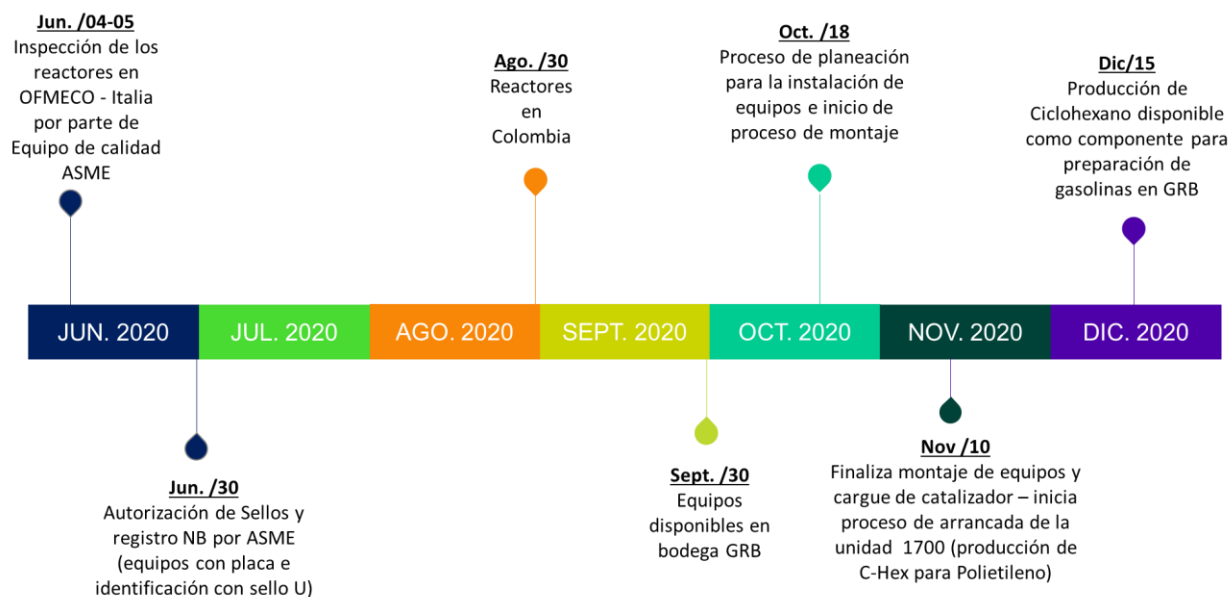
6.3.4 Plan operación reactores Hydrar

La calidad de los productos aromáticos en general debe cumplir con las especificaciones contempladas en el catálogo de productos de Ecopetrol por ende es cuestión de importancia la reposición y entrada en operación de los reactores R1701/02/03 especificados. Además, se programará corrida del catalizador H₃ (ver Apéndice L) para evaluar corrida a máxima capacidad de procesamiento (ver Apéndice M), rendimientos y calidad del ciclohexano producto bajo el esquema de operación de tres reactores según diseño original. En la Figura 11 se presentan los tiempos del plan para la operación de los reactores a partir del estado actual del proceso de reposición de los equipos los cuales fueron fabricados por una compañía italiana y se encuentran únicamente en el proceso de certificación de calidad de la fabricación por los entes autorizados.

Para el caso de operación de U1700 Hydrar una vez recuperada la confiabilidad de los tres reactores ya antes mencionados se presentan a continuación en la Tabla 7 los rendimientos esperados.

Figura 11.

Plan para la operación de los reactores R-1701/02/03 en la U-1700 hydrar.

**Tabla 7.**

Pronóstico de rendimientos a carga máxima confiable U-1700 Hydrar.

Cargas/Productos	BPD (KPCED)	%V	LB/PC	Ton/Dia	%Peso
Cargas ¹					
Benceno a Reactores	550	75	55,10	77	43
Benceno de Lavado	188	25	55,10	26	15
Gas de Hydeal	5350	-	0,03	76,6	42
Total cargas	738	100		180	100
Productos					
Ciclohexano	715	79	48,63	89	49
Benceno a Hydeal	188	21	55,10	26	15
Gas a G.C. (40% H ₂)	2675	-	0,05	64,4	36
Total productos	903	100		180	100

Nota. ¹ Con disponibilidad de tres reactores e inyección de 2 MPCED de H₂ adicional de alta pureza (H₂: 95 %, CO máx. 10 ppm. CO₂ máx. 25 ppm). Para la operación con dos reactores como se operaba desde el año 2015 solo se puede alcanzar 150-180 bpd como carga total con un rango de pureza del ciclo-hexano 90-95% peso.

Los valores mostrados en la Tabla 7 se dan teniendo en cuenta las cargas según diseño de la U-1700 y las cargas máximas confiables (extraídas del software PIDatalink) para los años donde la unidad no evidenció falla alguna en los 3 reactores, generando así datos confiables de operación.

6.4 Aspectos económicos torre separadora T-1504

Con el objetivo de tener un estimado económico de la recuperación de los platos de la torre se cotizó el servicio de desmontaje e instalación de 10 platos del fondo de la torre de xileno T-1504 (platos del 111 al 120); las condiciones del servicio se encuentran definidas en el (Apéndice N).

El tiempo de entrega ofrecido está basado considerando (2) turnos de 12 horas, 7 días por semana (lunes a domingo), adicional se considera el tiempo necesario para movilización de personal incluyendo; cursos de seguridad, exámenes médicos, credenciales de acceso, visas de trabajo, etc. (de 3 a 4 días para el ingreso a planta) Los tiempos de ejecución de las Columnas están ofertados considerando 9 horas de trabajo de rendimiento por turno (1 hora de almuerzo, 1 hora permiso de trabajo/preparación y 1 hora para cambio de turno) en (2) turnos de 12 horas, 7 días por semana (lunes a domingo), se describe en la Tabla 8.

Tabla 8.

Términos de ejecución de las actividades.

Ítem	Columnas	Tiempo	Unidad	Días de la semana	Turnos	Rendimiento por día
T-1504	ABSORBER	7.0	Días	Lun – Dom	2 (DOS)	18 horas.

El precio a suma global para esta propuesta se basa en el alcance del trabajo conocido como se menciona al principio y se detalla en la Tabla 9. De acuerdo con lo anterior se estima que la actividad de cambio de platos tendrá un costo de 188.000 USD\$, a esto se le suma un 30% correspondiente a la inspección de los internos mediante la técnica de Gamma Scanner para verificar condición de inundación (Flooding) y/o caída de platos y establecer un alcance más acertado de intervención mecánica, lo que significaría un costo total de ejecución de 244.000 USD.

Tabla 9.

Propuesta económica.

Ítem	Columnas	Cantidad	Total, USD
T-1504	TORRE DE XILENO	1	\$ 188.000

En la Tabla 10 se muestra el costo por barril de o-xileno de los años 2017, 2018 y 2019 y en la Tabla 11 se muestra el costo por barril de o-xileno basados en las proyecciones de ventas y precios de los productos Aromáticos suministrados por el Departamento de Economía de la GRB. A partir de esta información se calcula el margen por barril como la diferencia entre el precio de venta y costo de producción por barril, obteniendo un valor promedio de 63.5 USD/BL de margen bruto por barril.

Tabla 10.

Margen histórico o-xileno venta nacional.

Histórico margen O-xileno Venta Nacional			
USD/BL	2017	2018	2019
Precio venta	99,69	115,12	115,12
Costo Materia Prima	59,93	59,93	64,37
Costo operativo	74	86,72	79,39
Depreciación	9	11	9

Histórico margen O-xileno Venta Nacional			
USD/BL	2017	2018	2019
Impuestos	8	9	6
Costo por barril	66,3	67,2	71,1
Margen por barril O-Xil	33,38	47,93	44,01

Tabla 11.

Proyección margen o-xileno venta nacional.

Proyección margen O-xileno Venta Nacional				
USD/BL	2020	2021	2022	2023
Precio venta	107	112	133	139
Costo Materia Prima	51,6	51,9	51,9	55,6
Costo operativo	69,8	68,8	65,9	65,9
Depreciación	17	17	17	17
Impuestos	5,0	8,0	10,0	10,0
Costo por barril	58,0	58,5	58,4	62,1
Margen por barril O-Xil	49,0	53,5	74,6	76,9

El o-xileno que no sale como producto terminado por efecto de la pérdida de eficiencia de la T1504 se va con la corriente de xileno producto, sin alterar las propiedades fisicoquímicas. Los excedentes de xileno producto luego de cubrir la demanda nacional se destinan al mercado internacional. En la Tabla 12 se muestra el costo por barril de xileno de los años 2017, 2018 y 2019 y en la Tabla 13 se muestra el costo por barril de xileno teniendo en cuenta la proyección de ventas y precios de los productos Aromáticos suministrados por el Departamento de Economía de la GRB, esto para producto exportación. Estableciendo un valor promedio de 0,8 USD/BL de margen bruto por barril del producto exportación. Este sería el mismo margen que aportaría la corriente adicional por pérdidas de o-xileno.

Tabla 12.*Margen histórico xileno venta internacional.*

Histórico margen Xileno Venta Exportación			
USD/BL	2017	2018	2019
Precio venta	77,92	98,46	98,46
Costo Materia Prima	59,93	59,93	64,37
Costo operativo	74	86,72	79,39
Depreciación	9	11	9
Impuestos	8	9	6
Costo por barril	87,19	91,87	93,48
Margen por barril	-9,26	6,59	4,98

Tabla 13.*Proyección margen xileno venta internacional.*

Proyección margen Xileno Venta Exportación				
USD/BL	2020	2021	2022	2023
Precio venta	84,55	84,55	84,55	94,73
Costo Materia Prima	51,6	51,9	51,9	55,6
Costo operativo	69,8	68,8	65,9	65,9
Depreciación	17	17	17	17
Impuestos	5,0	8,0	10,0	10,0
Costo por barril	84,7	85,7	85,5	89,1
Margen por barril	-0,2	-1,2	-0,9	5,6

El diferencial de margen entre el o-xileno venta nacional y el xileno venta internacional, es decir, 63 USD, constituye al beneficio de margen por barril de o-xileno. De acuerdo con el análisis histórico realizado son en total 33 barriles de o-xileno por día que se recupera con la intervención mecánica de la torre, esto equivale a un beneficio neto de 700.000 USD/año y teniendo en cuenta que el costo de la intervención de los platos para alcanzar la eficiencia esperada de la T1504 es de 244.000 USD. Se estima entonces que el tiempo de la recuperación de la inversión es de 4-6 meses,

el cual fue estimado por medio del método “payback” que se define como la razón entre la inversión inicial o costo del proyecto y el beneficio anual neto.

6.5 Rendimientos esperados de los productos de interés

Producto del estudio, se evidencia que el complejo de aromáticos se encuentra preparado para producir el siguiente grupo de corrientes para el pool de gasolina de la GRB, sin mayores limitaciones para lograrlo. La tabla 14 resume las distintas corrientes y su composición.

Tabla 14.

Corriente producto, con destino hacia el pool de gasolina de la GRB.

Componente	% (v/v)	Q, BPD	IAD	Arom. % (v/v)	Bz % (v/v)	S, wppm
NHT	29,70%	1.983	61	11.4	1	1
Rafinado	27,50%	1.835	70	12	0.5	10
Platformado	19,60%	1.308	94	70	6.9	1
Extracto	6,50%	436	100	100	11.1	1
CHEX	4,50%	300	80.8	0	1	1
Tolueno+ Xilenos	9,60%	643	100	100	0	1
C9+	2,50%	167	93	100	0	1
Total	100%	6.672				

La calidad de la corriente equivalente con destino al pool de gasolina se estimó a partir de las corrientes presentes en la tabla 14, donde se consideran los principales parámetros de interés mostrados en la Tabla 15, Estos parámetros se definieron como se muestra en la ecuación 2 para el porcentaje de aromáticos presentes en la corriente equivalente.

$$\% \text{ Aromaticos} = \frac{\sum_{i=0}^n (Q_i * \% \text{Arom}_i)}{Q_T} \quad \text{Ecuación 2}$$

La anterior ecuación representa el cociente entre la suma-producto de los caudales de las corrientes que van al pool de gasolina con su respectivo valor del parámetro de interés y el caudal total, datos que son calculados a partir del balance volumétrico (ver Apéndice O) realizado a las diferentes unidades que comprenden el complejo de aromáticos de la GRB.

Tabla 15.

Identificación productos de interés.

Q, BPD	IAD	Arom. % (v/v)	Bz % (v/v)	S, wppm	Observaciones
6672,3	77,9	39,1	2,6	3,5	incluye 40% de tolueno+ xilenos y 60% C9+

Con respecto a la materia prima para la operación, el Departamento de Planeación de la Refinería, explicó que existe la disponibilidad, pero que la misma está determinada por los económicos mensuales que calcula la refinería. Visto de otra manera, en la medida que sea atractivo la producción de componentes para el pool de gasolina, la materia prima estará disponible. Es importante destacar que los valores reportados anteriormente, fueron calculados en base a los pronósticos estimados de producción presentado en el (Apéndice P).

7. Conclusiones

- Según el análisis de los históricos se evidencia que la planta Aromáticos ha producido una mezcla de corrientes rica en componentes como refinato, ciclohexano, toluenos, xilenos, en flujos que sumados llegan hasta 6672,3 bpd.

- Con este proyecto se logró validar que la iniciativa es factible en términos operativos y económicos, permitiendo un incremento de carga al complejo Aromático de 16000 bpd. Sin embargo, se debe asegurar la disponibilidad de la materia prima para la operación con especificación (PIE: 120-130°F y PFE:370-400°F) para garantizar fracciones aromáticas más aprovechables.

- Según los aspectos económicos evaluados para la alternativa de la torre T-1504 se encontró una oportunidad de beneficios de 600.000 USD\$/año, derivados de la recuperación de 33 bpd de *o*-xileno.

8. Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos y las conclusiones trazadas, se plantean las siguientes recomendaciones para dar un avance confiable y continuidad a esta iniciativa de proyecto:

- Se enmarca la necesidad de la instalación de los equipos de transferencia de calor E-1322 A/B para enfriar la corriente de nafta hidrotratada de Unifining al pool de gasolinas.

- Limpiar e inspeccionar la barra atomizadora de carga “spray bar”, debido al alto riesgo de obstrucción y acarreo de pérdida de capacidad de carga en Platforming. Que, sumado con la presencia de sólidos, incrementa la obstrucción en los filtros de carga líquida.

- Se recomienda priorizar el control de contenido de cloruros en las naftas de carga a U1300 asegurando un correcto desalado y lavado de sales disminuyendo el contenido de cloruros a U1400 Sulfolane (2 mpy máximo).

- Se sugiere realizar un análisis económico detallado con las nuevas condiciones de operación establecidas y la respectiva simulación del proceso, para verificar los valores estimados de producción.
- En un futuro trabajo, realizar estudio de prefactibilidad para la conversión de la U-1600 en hidrotratadora de nafta virgen.

Referencias Bibliográficas

Arango, J. H. (2009). Calidad de los combustibles en Colombia. *Revista de ingeniería-Universidad de los Andes*, 3-8.

Ardila, M. J. (2017). *Evaluación técnico-económica de la recuperación de productos aromáticos en la torre extractora T-1401 de la unidad de extracción líquido-líquido U-1400 Sulfolane, refinería de Barrancabermeja, Ecopetrol S.A.*

Ecopetrol S.A. . (2015). *Gerencia complejo Barrancabermeja. Departamento de petroquímica, Manual de operación U-1300 prefraccionamiento/unifining/platforming.* Barrancabermeja.

Ecopetrol S.A. . (2015). *Gerencia complejo Barrancabermeja. Departamento de petroquímica, Manual de operación U-1400 Sulfolane.* Barrancabermeja.

Ecopetrol S.A. . (2015). *Gerencia complejo Barrancabermeja. Departamento de petroquímica, Manual de operación U-1700 Hydrar.* Barrancabermeja.

Ecopetrol S.A. . (2019). *Refinería de Barrancabermeja-Ecopetrol.* Obtenido de <https://www.nuevoportal.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/sala-de-prensa/boletinesprensa/boletines-2019>

Ecopetrol S.A. (2004). *Vicepresidencia refinación y petroquímica, Manual de procesos, Gerencia complejo Barrancabermeja.* Barrancabermeja.

Ecopetrol S.A. (2014). *Guía-3-Ecopetrol S.A.* Obtenido de <https://www.utsvirtual.edu.co/sitio/blogsuts/wp-content/blogs.dir/51/files/2014/05/Guia-3-Ecopetrol-S.A..pdf>

Ecopetrol S.A. (2015). *5Gerencia complejo Barrancabermeja. Departamento de petroquímica, Manual de descripción de procesos U-1300, volumen 4.* Barrancabermeja.

Ecopetrol S.A. (2020). *Actualización plan de negocio 2020-2022.* Barrancabermeja: Ecopetrol.

Ecopetrol S.A. (2020). *Ecopetrol distribuye combustibles de calidad internacional a los colombianos.* Obtenido de https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/?1dmy&page=detalleNoticias&urile=wcm%3Apath%3A%2Fecopetrol_wcm_library%2Fas_es%2Fnoticias%2Fnoticias%2B2020%2Fnoticias%2Bnoviembre%2Fecopetrol-distribuye-combustibles-calidad-internacional-a-colombianos

Lieberman, N. P., & Lieberman, E. T. (2014). *Working Guide to Process Equipment 4ta. Ed.* New York: McGraw. Hill Education.

Lopez, J. R. (2014). *Optimización del plan de mantenimiento centrado en confiabilidad para los equipos rotativos en la planta de Aromáticos de la GRB de Ecopetrol S.A.*

Rodríguez Arévalo, S. A. (2020). *Evaluación del margen bruto de utilidad de la planta de aromáticos de la GRB en escenarios de procesamiento de nafta hidrocraqueada y producción constante de BT.*

Stellman, J. M., Osinsky, D., & Markkanen, P. (2000). Guía de Productos Químicos. *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*, 312-313.

Apéndices

Apéndice A Principales inconvenientes detectados para alcanzar incremento de la extracción de aromáticos en la T-1401.

Adicional a los inconvenientes tratados en la (sección 5.1) para alcanzar el incremento de la extracción de aromáticos en la torre extractora T-1401 se suman los enunciados a continuación en la Tabla A1.

Tabla A1.

Recuperación de aromáticos y sus limitaciones T-1401.

Equipo	Inconveniente detectado
T-1401	No hay operación del sistema de discos rotatorios desde el año 1988. Incremento en el contenido de aromáticos pesados de 9 a 15% en la carga extractora T-1401, al igual que la reducción al 54% en promedio vs 56% diseño en el rendimiento de extracción, con mayores pérdidas en productos aromáticos en el refinato, desde el año 2014, luego de la ampliación de capacidad en la sección U-1300 (platforming).

Nota. Tomado de: Manuel, A. (2017) Evaluación técnico-económica de la recuperación de productos aromáticos en la torre extractora T-1401 de la unidad de extracción líquido-líquido U-1400 Sulfolane mejorada, refinería de Barrancabermeja, Ecopetrol S.A. Bucaramanga,.

Apéndice B Carga máxima U-1400.

Los valores máximos de carga a la U1400, evaluados desde el año 2001 a la fecha, con su respectiva relación existente de solvente/carga se presentan en la Tabla B1.

Tabla B1.

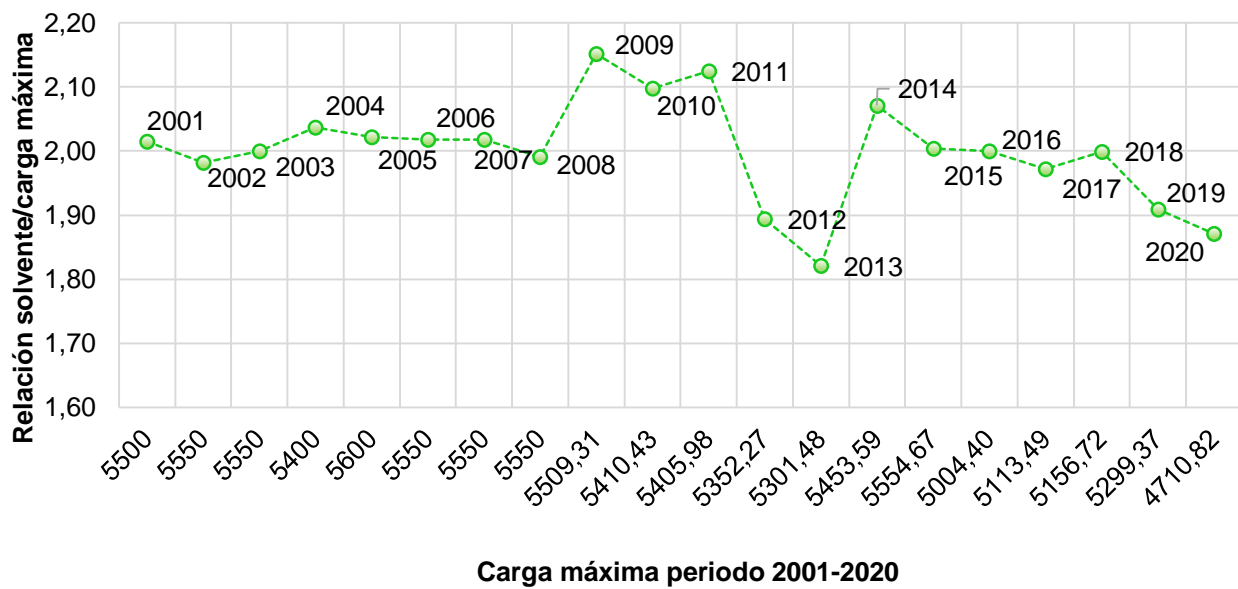
Máximos valores de operación U1400 por año.

Año	Carga máxima	Cantidad de solvente respecto carga máxima	Relación solvente/carga máx.
2001	5500	11080	2
2002	5550	11000	1,98
2003	5550	11100	2
2004	5400	11000	2,04
2005	5600	11320	2,02
2006	5550	11200	2,02
2007	5550	11200	2,02
2008	5550	11050	1,99
2009	5509	11852,8	2,15
2010	5410	11350	2,10
2011	5406	11487	2,12
2012	5352	10136,4	1,89
2013	5302	9654,6	1,82
2014	5454	11294,9	2,07
2015	5555	11132,9	2,00
2016	5004	10010,9	2,00
2017	5114	10085,4	1,97
2018	5157	10310,4	2,00
2019	5299	10114,9	1,91
2020	4711	8812,9	1,87

Observándose que la relación solvente: carga sugerida de 2 : 1, se logra mantener incluso con los valores más altos de carga y se ha logrado disminuir hasta 1,82 : 1, especialmente con bajas cargas, asegurando calidad de los productos. En la Figura B1 se evidencia esta tendencia.

Figura B1.

Relación solvente/carga requerido para realizar la extracción a máxima carga, años (2001-2020).



Apéndice C Condiciones de operación solvente Sulfolane.

El Sulfolane usado para la extracción en la U-1400, contiene las especificaciones que se detallan en la tabla C1.

Tabla C1.

Especificación solvente Sulfolane.

Propiedades	Especificación
Composición (% peso)	
Sulfolane-anhídrido	97,5
Mono-etilamina	0,05
Agua	2,5
Apariencia, olor y estado físico	Líquido viscoso incoloro o ligeramente amarillo
Gravedad específica (agua=1)	1,26
Punto de ebullición (°C/F)	285/545
Punto de fusión (°C/F)	27,4/81,3
Flash Point-Copa Abierta (°C/F)	117/242,6
Punto de congelación (°C/F)	10 / 50
Presión de vapor (mmHg)	14,53
Tensión superficial (dyn/cm)	35,5
Viscosidad a 30°C (cP)	10,3
Calor de combustión (Btu/lb)	-9500
pH	5,5-6,5
Solubilidad	Miscible, en agua, acetona, tolueno a 30°C. Parcialmente miscible con octanos, olefinas, naftenos.

Apéndice D. Datos (típicos) de operación T-1401.

Tabla D1.

Datos de las corrientes de proceso T-1401 modelo caso actual.

Propiedades	Caso actual T-1401			Corrientes de salida	
	Corrientes de entrada			Refinado	Extracto
	Platformado	Solvente	Reciclo D-1401		
Gravedad específica	0,81	1,27	0,75	0,71	1,18
Densidad (Lb/ft ³)	50,29	79,22	47,01	44,07	73,31
Flujo vol. (BPD)	5.492	10.559	2.581	1.773	16.859
Flujo másico (LBH)	64.60	195.682	28.382	18.421	270.252
T (°F)	90	242,55	100	235,7	187,63
P(psia)	164,7	164,7	124,7	77,7	100
% peso (g/100g)					
No aromáticos	30,81	-	54,41	84,81	7,3
Benceno	8,52	-	19,21	0,05	4,05
Tolueno	25,4	-	15,57	0,04	7,7
EB + m,p-xilenos	20,16	-	7,25	0,75	5,53
O-xileno	5,40	-	1,54	0,49	1,42
C9+Cumeno	9,71	-	2	9,87	1,86
Hidrocarburo	100	-	100	96	27,86
Sulfolane	-	98	-	4	71,28
Agua	-	2	-	-	0,86
% peso (g/100g)					
Agua	-	2	-	-	0,8
Sulfolane	-	98	-	4	71,3
HC AROM	69,2	-	45,6	11,2	20,6
HC NO AROM	30,8	-	54,4	84,8	7,3
HC Total	100	-	100	96	27,9

Apéndice E Valores de operación corrida (Julio- agosto, 2019), obteniendo máximo porcentaje de extracción.

Tabla E1.

Propiedades de la corriente de proceso para una óptima extracción.

Propiedad	Unidad medida	Tag	Data promedio
Carga torre 1401	BPD	U1400-FIC_1401	4600
Cima T-1401	°F	U1400-TI_1401	215
Fondo T-1401	°F	U1400-TI_1402	168
Presión a T-1401	mmHg	U1400-PT_1405	62
Registro-nivel Lg	%	U1400-LI_LG_T1402	53
Registro-nivel Lg	%	U1400-LI_LG_T1403	45
Registro-nivel Lg	%	U1400-LI_LG_T1404	57
Rafinato a T-1402	BPD	U1400-FT_1403	1512
Agua lavado a T-1402	BPD	U1400-FT_1405	351
Nivel T-1402	%	U1400-LT_1406	56
Relación solvente/carga	-	-	1,86

Apéndice F Escenarios de operación U-1500 fraccionamiento.

En base al estudio realizado mediante verificación de información de comportamiento históricos de operación de la unidad U-1500 se definieron 3 posibles escenarios de operación establecidos, los cuales son mencionados a continuación:

- Composición característica del proceso de Aromatización de la nafta virgen en la unidad U1300. En este periodo de operación, la unidad U1500 solamente carga el extracto aromático recuperado en la unidad U1400 y generado mediante reformado catalítico en la unidad U1300. La unidad U1600 está fuera de servicio.

- Mayor concentración de benceno debido a que la carga de la unidad U1500 es una mezcla del extracto aromático de la unidad U1400 y de la mezcla de benceno y tolueno provenientes de la operación de la unidad U1600 (cuya función es transformar tolueno en benceno).

- Opera con carga proveniente de la Unidad U1400, pero cuenta con una composición mucho más pesada (alto contenido de cumenos C9+ en general) debido a las cargas de crudos más pesados, API menor a 20 grados, que puede manejar la refinería.

La Tabla F1 resume la composición para cada uno de los tres casos escogidos.

Tabla F1.

Composición (% volumen) carga a U1500.

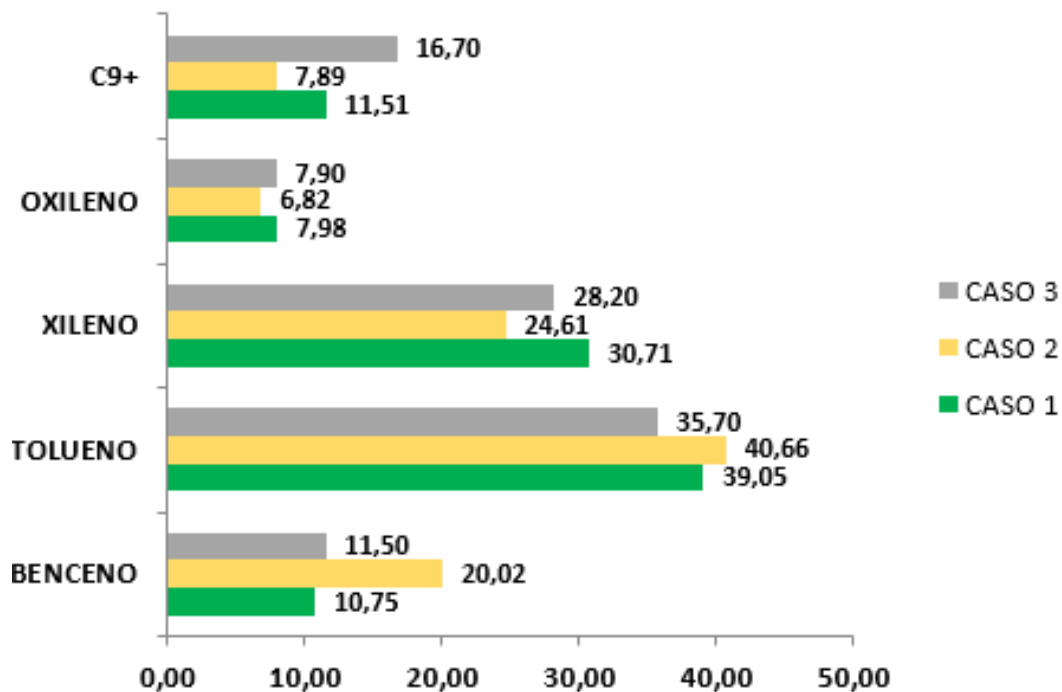
Compuesto	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Benceno	10,75	20,02	11,5
Tolueno	39,05	40,66	35,7
P-Xileno	7,76	6,16	7,18

Compuesto	Caso 1	Caso 2	Caso 3
M-xileno	17,74	13,17	16,08
O-xileno	7,98	6,82	7,9
Etilbenceno	5,21	4,28	4,89
C9+	11,23	7,56	16,46
Cumenos	0,22	0,2	0,27
C10	0,06	0,13	0,02

La distribución de la composición, según cada caso, se aprecia también en la figura F1.

Figura F1.

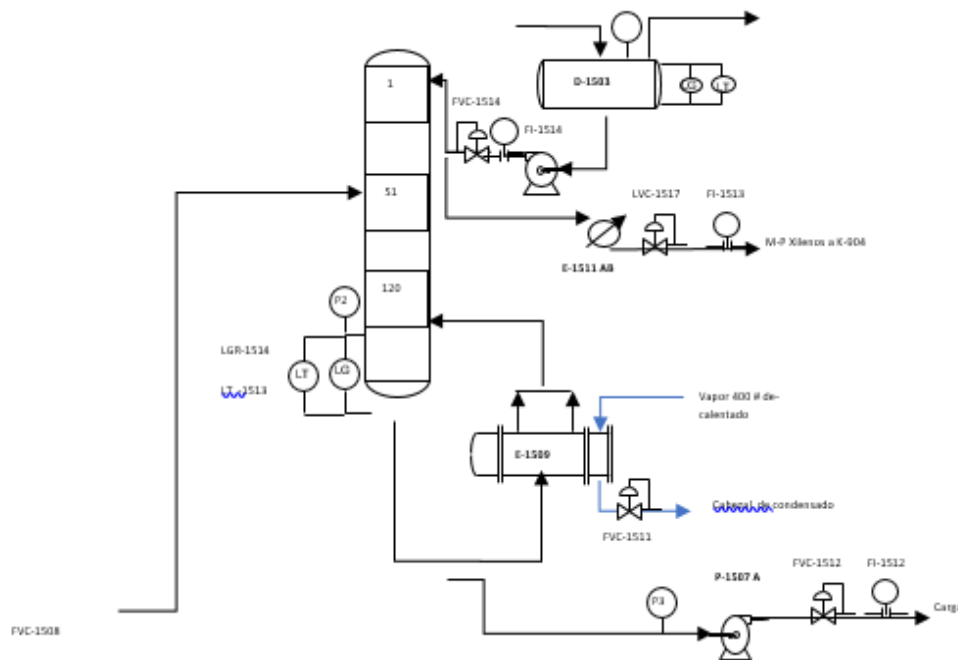
Composición carga U1500.



Apéndice G Torre de destilación T-1504.

Figura G1.

Torre de Fraccionamiento de Xilenos T-1504.

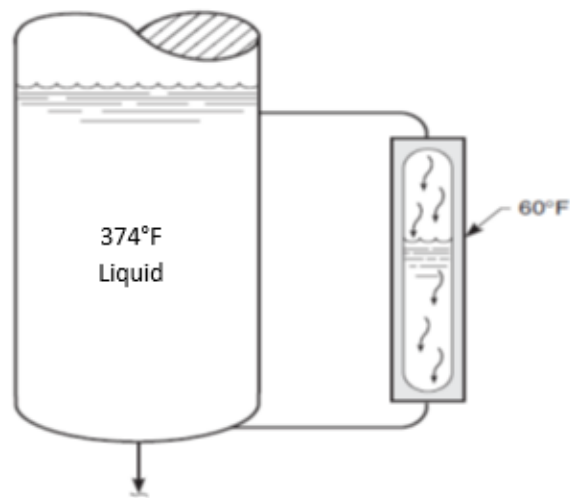


Circuito de cima de T-1504:

Los vapores que salen por la cima de la T-1504 son una mezcla de xilenos y etilbenceno, y registran temperatura en el indicador de temperatura de vapores de cima, TI-1525. Luego, estos vapores se condensan en el lado tubos del condensador de cima, E-1510 con el agua de enfriamiento circulando por el lado casco. El condensado de Xileno entra al tambor acumulador de cima de la separadora, D-1503.

Circuito de fondo de T-1504:

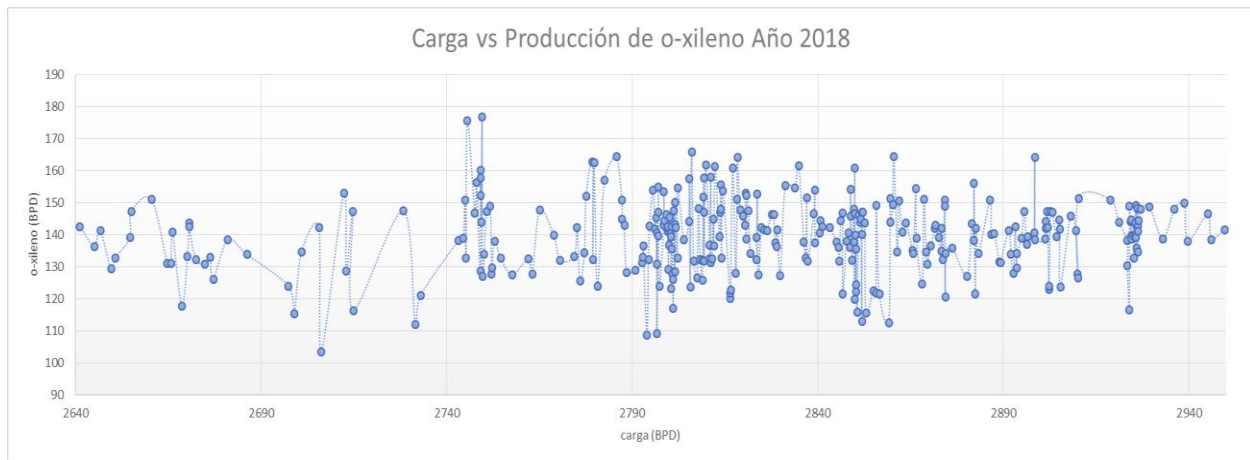
La corriente del fondo de la separadora de Xilenos T-1504 registra temperatura en el Indicador de temperatura de fondos, TI-1526, y se divide en dos: la de circulación del fondo de la T-1504, y la que se dirige como carga hacia la columna rectificadora de O-xileno, T-1505.

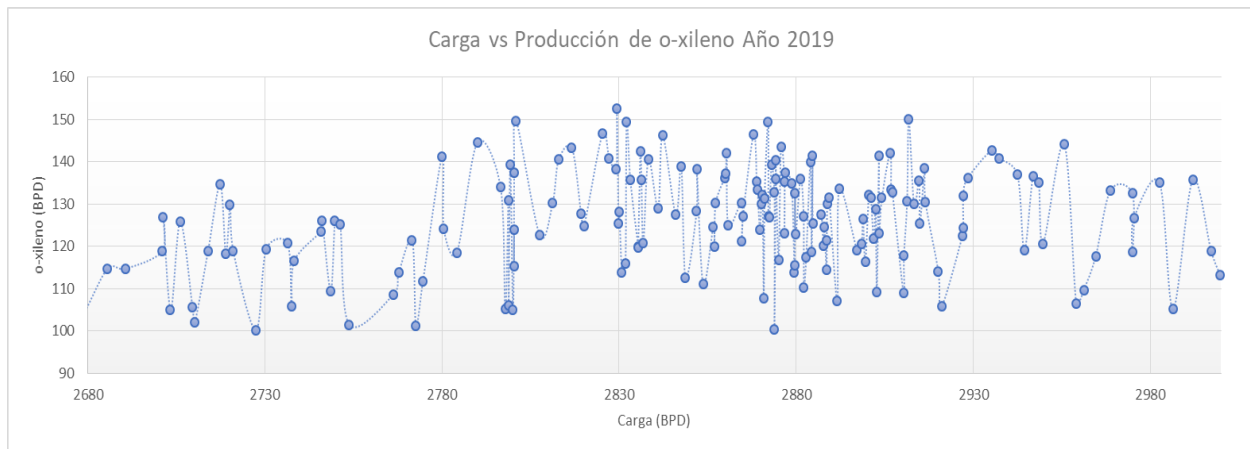
Apéndice H. “Tapped out”**Figura H1.***“Tapped out”*

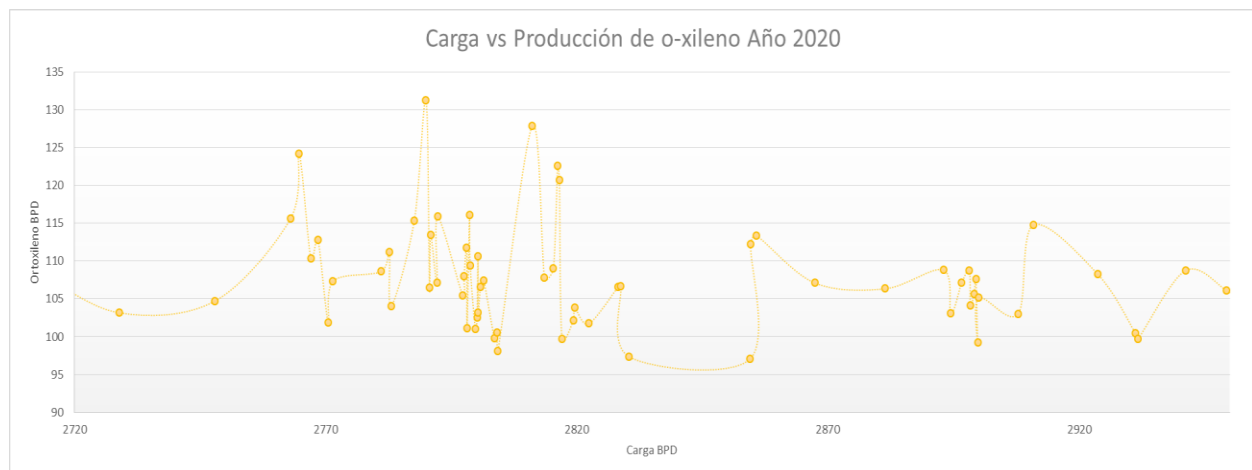
Tapped out: Este es un mecanismo de inundación debido a un alto nivel de líquido causado por una calibración defectuosa del indicador de nivel. El nivel de líquido ha aumentado por encima del punto de conexión de indicación de nivel superior.

Apéndice I Producción o-xileno año 2018.**Figura II.**

Tendencia de producción de o-xileno, año 2018.



Apéndice J Producción o-xileno año 2019.**Figura J1.***Tendencia de producción, año 2019.*

Apéndice K Producción o-xileno año 2020.**Figura K1.***Tendencia de producción, año 2020.*

Apéndice L Procedimiento de cargue del catalizador H₃.

- Cargue del catalizador

Para realizar el cargue de catalizador de los reactores SR-1701/02/03 se debe atender los lineamientos mencionados en el procedimiento de Ecopetrol PPQ-I-518 Cargue del catalizador H₃ Hydrar.

- Procedimiento para cargue catalizador H₃ UOP Hydrar

- **Operaciones previas al cargue del catalizador**

El interior de los reactores R-1701/02/03 y sus partes internas deben estar completamente limpias y secas.

Verificar que el cono ranurado o rejilla soporte, sobre la boquilla de fondo del reactor, este bien colocada y en ella esté asegurada correctamente la platina de orejas que permite el descargue del catalizador.

Disponer de la cantidad de las bolas de alúmina requeridas para colocar las capas de soporte y de la parte superior del lecho catalítico, como se presenta en el diagrama de la Figura L1 y en la Tabla L1, adjuntas.

Disponer de la cantidad de catalizador H-3 requerido, como se muestra en el diagrama de la Figura L1 y en la Tabla L1, adjuntas.

Instalar una manga de lona de 8 pies de longitud en la boquilla de la tolva, la cual se introducirá en el interior del reactor, cuya finalidad es permitir un cargue uniforme y sin impacto del catalizador con las bolas de alúmina del fondo (puede ocasionar canalización y migración del catalizador si no se usa la manga).

Disponer de una grúa para subir los tambores con las bolas de alúmina y los tambores con el catalizador hasta la plataforma superior de los reactores.

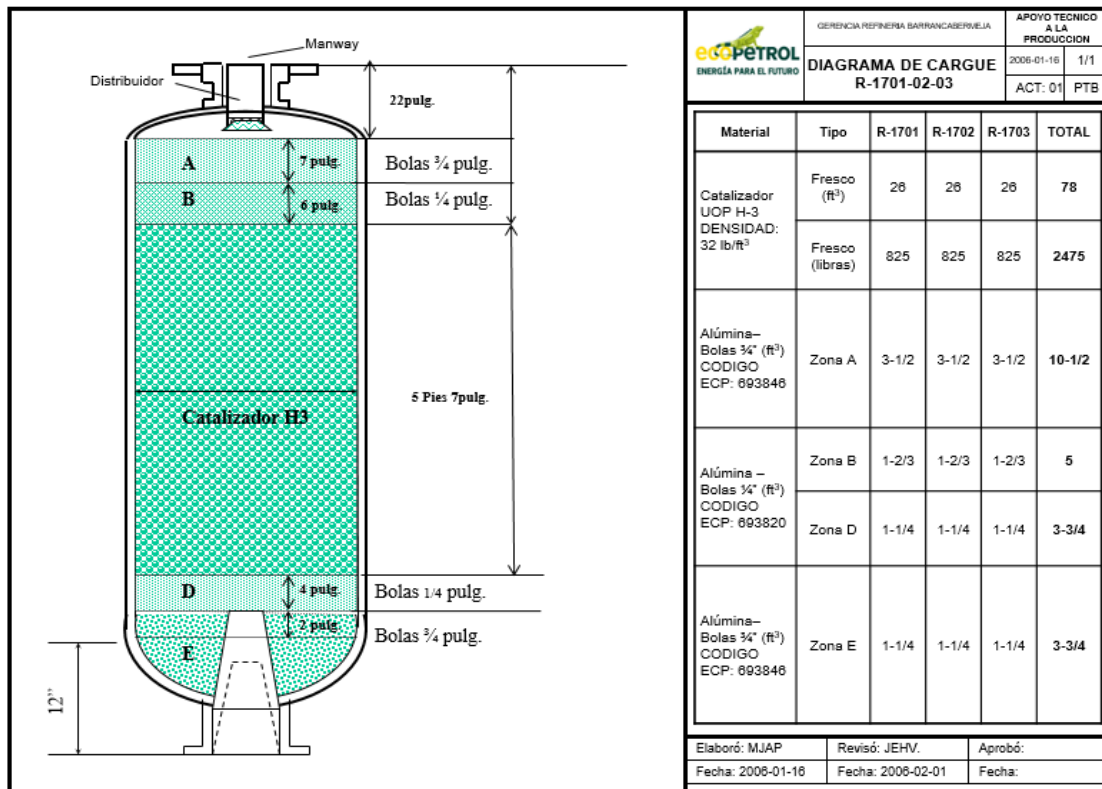
Tabla L1.

Requerimiento de material inerte y catalizador para los reactores de Hydrar.

Material	Tipo	R-1701	R-1702	R-1703	Total
Catalizador UOP-H3	Fresco (ft3)	26	26	26	78
DENSIDAD:32 lb/ft3	Fresco (libras)	825	825	825	2475
Alúmina - Bolas 3/4" (ft3) Código ECP: 693846	Zona A	3-1/2	3-1/2	3-1/2	10-1/2
Alúmina - Bolas 1/4" (ft3) Código ECP: 693820	Zona B	1-3/2	1-3/2	1-3/2	5
	Zona D	1-1/4	1-1/4	1-1/4	3-3/4
Alúmina - Bolas 3/4" (ft3) Código ECP: 693820	Zona E	1-1/4	1-1/4	1-1/4	3-3/4

Figura L1.

Diagrama de carga reactores R1701/02/03.



Apéndice M Arranque y corrida operacional a máxima carga de Hydrar U-1700.

Actualmente la unidad U-1700 opera circulando hidrogeno hacia HDT, utilizando la infraestructura actual de la unidad. El Compresor 1601 A/B toma el hidrogeno excedente de Unifining 5,5 MPCED, lo envía hacia la unidad 1700 ingresando por el FIC-1709. El hidrógeno es tratado en las torres 1701 A y B con soda y condensado respectivamente. Posteriormente la corriente by-pasea la zona de reacción de la unidad y pasa directamente al D-1702, de allí por medio del control del PIC-1720 se envía el gas a la red de hidrogeno de la GRB.

De acuerdo con lo anterior el plan de arrancada de la unidad debe seguir el paso a paso de los instructivos operacionales PPQ-PPQ-F-021, PPQ-PPQ-F-025 y PPQ-PPQ-I-057, sin embargo, teniendo en cuenta que los procedimientos incluyen actividades relacionadas con el alineamiento de hidrogeno y tratamientos requiere de una modificación. En la tabla M1 se presenta el plan de arrancada de la unidad teniendo en cuenta las condiciones actuales y los tiempos proyectados para estabilizar la unidad hasta obtener ciclohexano en especificaciones. Se espera que en un tiempo de 50 horas una vez finalicen las actividades de mantenimiento relacionadas con el cambio de los reactores y cargue de catalizador, incluido el retiro de facilidades de by-pass de las zonas de reacción de la unidad, se tenga la corriente de ciclohexano disponible para el almacenamiento en tanques y/o envío de la corriente para la preparación de gasolinas.

Con el fin de evaluar y verificar el desempeño operacional de los equipos de la unidad U-1700 - Hydrar y el desempeño del catalizador de los reactores 1701/02/03. Se planea realizar una corrida de evaluación durante 10 días a partir del día en el que se recupera la confiabilidad de los reactores de la unidad.

De manera previa al inicio de toma de datos se requiere asegurar la confiabilidad de los siguientes medidores de flujo y temperaturas: FT_1709, FT_1703, FT_1704, FT_1708, FT_1710, TI_1701, FT_1714, TI_1701, TI_1704, TI_1705, TI_1707, TI-1709 y TI_1712 y la disponibilidad de 6.750 barriles de benceno mínimo que se logrará con el inventario máximo en los tanques K1502/03 y K1707, y la operación normal de la U-1500 con una producción diaria mínima de 280 BLS para garantizar el inicio de la corrida y evitar la cavitación de la bomba P-1705 A/B durante el aumento de carga a la unidad U1700.

La corrida se iniciará un día después de alcanzar las condiciones de confiabilidad mecánica de la unidad, cargas y medición necesarias, tomando como base las cargas actuales de estabilidad de la unidad e incrementándolas de acuerdo con los valores definidos como máxima carga a la unidad. En cada caso, a las 8:00 a.m. del día respectivo se iniciarán las acciones requeridas para el incremento de carga (junto con la carga misma es necesario manipular otras variables) y esta será mantenida hasta completar 48 horas.

Se define un programa de muestreo y análisis del laboratorio el cual se describe en la tabla M2, donde se indican las muestras y los análisis requeridos a la Coordinación de Inspección de Calidad para completar la información de la corrida, para lo cual se debe realizar la solicitud y acuerdo previo.

Tabla M2.*Programa del análisis de laboratorio.*

ANALISIS	16-3	16-5	17-2	17-4	17-8	BZ Rico
Cromatografía	E	R	R	E		E
Destilación			E			
Gastado					R	
Dureza						
% Soda- ALCALINIDAD TOTAL					R	
Gravedad API / Especifica a 60 °F	E		E	E		
AZUFRE						

(*) Las muestras se deben tomar en TA (o según acuerdo con laboratorio GRB)

(**) E: Especial cada dos días / R: Rutina diaria.

Durante la corrida se tomarán datos de tablero y campo para llenar los diagramas de banderas y los diferentes formatos (amperajes de motores; % de apertura de válvulas de control; RPM de turbinas; temperaturas, flujos y presiones en intercambiadores de calor y consumos de servicios industriales).

Los datos a tomar durante la corrida son los siguientes:

Tabla M3.*Datos a tomar durante la corrida.*

Datos	FREC.	Responsables
Diagrama de Banderas de las unidades, Consumos de energía, Balances de Masa y Volumen, Rendimientos y Calidad de cargas y productos.	Diaria	Ing. de proceso, SUP. COR.
% de apertura de Válvulas de control.	Diaria	Operador/SUP COR.
Amperaje de Motores.	Diaria	Eléctrico/ Ing. Electricista
Velocidad de turbinas	Diaria	Mecánico.
Instrumentación, Cromatógrafos y válvulas de control.	Diaria	Operador /Ing. Electrónico.
Comportamiento y variables operacionales de Intercambiadores.	Diaria	Operador /Ing. Estático.

Datos	FREC.	Responsables
Comportamiento y variables operacionales de Torres, Tambores y Tanques.	Diaria	Operador /Ing. Estático.
Comportamiento y variables operacionales de bombas.	Diaria	Operador /Ing. Rotativo.
Comportamiento y variables operacionales de compresores.	Diaria	Operador /Ing. Rotativo.

Se realizará entrega de los formatos correspondientes para la consignación de los datos tomados en el cuarto de control diariamente. Adicionalmente a los datos obtenidos de campo se requiere determinar los siguientes valores, descritos en las tablas M4, M5 y M6.

Tabla M4.

Cargas y rendimientos.

Cargas/Rendimientos	Unidad	Caso Base GC-VO	Valores
Cargas			
Carga Total a Reactores	BPD	350 a 525	
Carga a R-1702	BPD	192 a 288	
Carga a R-1703	BPD	0	
Carga a R-1701	BPD	150 a 237	
Benceno de lavado	BPD	150 a 200	
H2 carga (DISEÑO)	KPCED	3.500 a 5.500	
Corrientes intermedias			
Ciclohexano reciclo	BPD	470 a 950	
Reflujo T1703	BPD	160 a 260	
Productos			
Ciclohexano Producto	BPD	455 a 700	
H2 a GC efluentes de reacción	PCED	2.500.000 máx.	
Gases de cima T1703	PCED	110000 máx.	
Calidad			
Contenido de benceno	ppm	1000 máx.	
Hidrogeno Carga (Hydeal E/S)	% peso	74 % mol min.	
Hidrogeno salida	% peso	45 min.	
Soda	% gastado	40 máx.	

Tabla M5.*Relaciones de la unidad.*

Relaciones	Unidad	GC-VO	VALORES
Relación H2/HC	PCE/BPD	0,5 a 1,5	
Relación Reciclo/Carga	BPD/BPD	1,1 a 1,5	
Distribución de carga R1701	%	45 a 55	
Distribución de carga R1703	%	-	
Distribución de carga R1702	%	45 a 55	
Rendimiento Liquido	%	125 a 130	

Tabla M6.*Condiciones operacionales (carga y rendimientos) unidad U-1700 (puesta en marcha).*

Condiciones Operacionales	Caso base	Unidad	Valores
Temperatura entrada R-1701	330 a 430	°F	
Temperatura salida R-1701	610 a 650	°F	
Temperatura entrada R-1702	330 a 430	°F	
Temperatura salida R-1702	610 a 650	°F	
Temperatura entrada R-1703	330 a 430	°F	
Temperatura salida R-1703	610 a 650	°F	
Presión D1702	385 a 400	psig	
Presión T1703	70 a 90	psig	
Temperatura de cima T1703	260 a 320	°F	
Temperatura de fondo T1703	310 a 345	°F	
Reflujo T1703	150-250	BPD	

Apéndice N Condiciones de servicio para ejecución de trabajos T-1504.

- Movilización

Soporte en campo (planta de Aromáticos) de personal calificado para la realización de los trabajos, incluida movilización, logística, trámites legales documentales (seguros, visas), tramites médicos, entre otros.

- Entrega de la Columna T1504

Instalación del SAS, bloqueos de líneas de proceso y la desocupación y descontaminación estarán a cargo de Ecopetrol S.A. La apertura de Manhole de la torre y el proceso de ventilación con tiro forzado por cuenta del ejecutor.

- Identificación, selección y traslado de materiales de internos en almacén

Revisión de los documentos de embarque emitidos por el fabricante de los internos de la torre, verificando que las cantidades, descripción y material cumplan con los dibujos de instalación. Identificación en almacén de cada una de las cajas, identificando por caja los internos requeridos de acuerdo con la secuencia de instalación, coordinación de la carga, transporte y descarga de las cajas de internos desde bodega a la planta. Apertura de cajas, habilitado y cuantificación de piezas e internos de acuerdo con los “Packing list” del fabricante.

- Desmontaje e instalación de nuevos internos

Apertura de manways del plato No.69 al 120 (2 piezas por plato), desmantelamiento parcial del plato No.110, desmantelamiento y retiro de platos de 2 pasos del No.111 al 120, desmantelamiento y retiro de seal pan debajo de plato No.120. Instalación, armado y nivelación de sea pan debajo de plato No.120, instalación, armado y nivelación de platos de 2 pasos del plato No.120 al 111, normalización de plato No.110 y limpieza manual de platos del No.110 al 120.

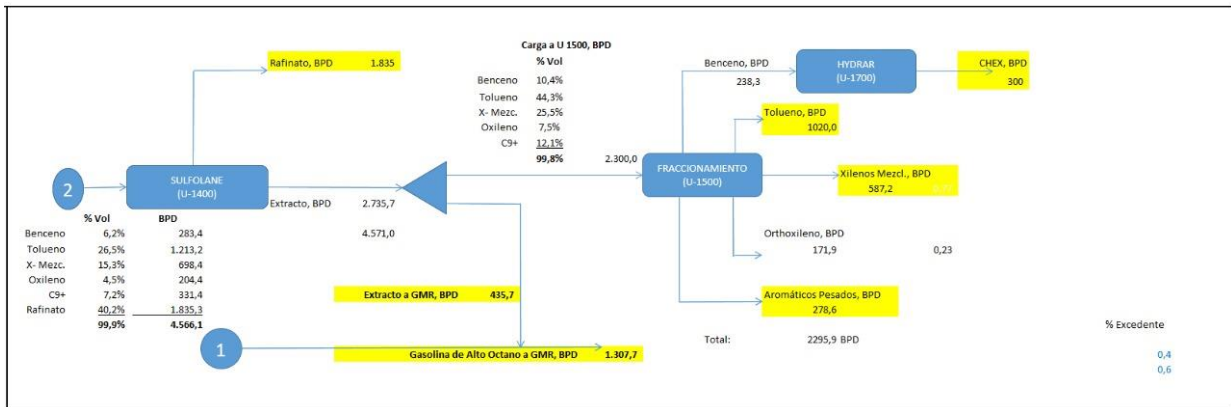
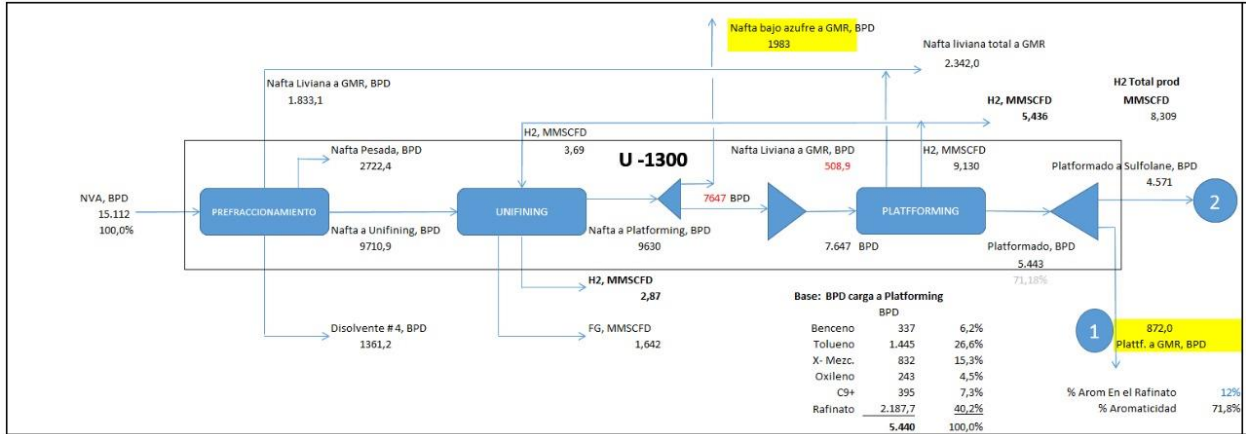
- Inspección final y entrega de Columna

Inspección final por Ecopetrol y Fabricante, cierre de mandas de platos del No.120 al 69, desmantelamiento y retiro de andamio del fondo de la torre, cierre con torque controlado de Manjole de la Torre.

Apéndice O Balance volumétrico planta Aromáticos.

Figura O1.

Esquema operacional de la iniciativa.



Apéndice P Resumen rendimientos máximos de las unidades de la planta de aromáticos de la GRB.

se presentan el resumen de los rendimientos máximos de las diferentes unidades de la planta de aromáticos como referencia. Se incluye en la proyección de rendimientos la producción de nafta hidrotratada a gasolina motor dada la expectativa que se inicie con la operación de la fase I de la iniciativa HMR-04 con el envío de excedentes de nafta hidrotratada desde U1300 Unifining al pool de gasolina motor con el objetivo de garantizar la calidad de los combustibles con bajo azufre para entrega a clientes.

Tabla P1.

Pronóstico de rendimientos cargas máximas confiables U1300: Pre fraccionamiento-Unifining-Platforming y U1400: Sulfolane con implementación de la Fase I de la iniciativa.

CARGAS/PRODUCTOS	BPD (KPCED)	%V	LB/PC	TON DIA	%PESO
Carga ¹					
Nafta Virgen	16550	100	47,45	2004	100,0
Productos Gaseosos					
Gas a Fuel gas D1306	(1000)	-	0,09	42,7	2,1
Gas a Fuel gas D1308	(300)	-	0,09	11,9	0,6
Gas Hidrógeno Excedente PSA	(3000)	-	0,02	30,0	1,5
Gas D1304 a Hydeal (80% H2)	(5500)	-	0,02	55,0	2,7
Productos Líquidos					
Nafta liviana cima T-1301	2500	16	42	268	13,4
Nafta Pesada fondo T-1302	3500	22	50	447	22,3
Nafta Hidrotratada a GM	3550	23	46	417	20,8
Nafta liviana cima T-1304	15	0	39	1,49	0,1
Nafta liviana cima T-1305	1150	7	35	103	5,1
Platformado	5000	32	49,3	629	31,4

CARGAS/PRODUCTOS	BPD (KPCED)	%V	LB/PC	TON DIA	%PESO
	15715	100			100,0
Rafinado	2200	44	43,3	243	38,7
Extracto	2800	56	54	386	61,3

CARGA UNIDADES	BPD	% VOL. DISEÑO	ESPECIFICACIONES			
			PIE/PFE, °F	CL, ppm	S, ppm	N, ppm
Pre fraccionamiento	16550	100	120 / 390	2	100	1
Unifining	10000	85	180 / 320	2	80	1
Platforming	7000	74	180 / 320	0,5	0,5	0,5
Sulfolane	5000	106	135 / 355	< 2ppb	< 0,5	<0,5
N+2A (Nafta de Carga)			> 50	% peso		
Aromaticidad			68 – 70	% peso		

¹ Según disponibilidad de rendimientos e inventarios de naftas de-bautizadas y vírgenes con especificación PIE: 120-130°F y PFE: 370-400 °F. Para una carga mínima los valores de carga son en promedio 10,5 Kbps para U1300 Pre-fraccionamiento, 7000 bpd para U1300 Unifining y 7000 bpd para U1300 Platforming en este caso no se implementaría Fase I de la iniciativa HMR-04 según caso de negocio.

Rendimiento Platforming: 74% vol. al comienzo del ciclo de vida y 66% vol. al final del ciclo de vida del catalizador R-56 en RON 96-98.

Aromaticidad Platforming: 68-70% peso de aromáticos en Platformado

Rendimiento Sulfolane: 56-58 % vol.

A partir de la extracción que se alcance en U1400 Sulfolane y con operación de U1600 Hydeal a mínima carga los rendimientos esperados se presentan en la Tabla P2.

Tabla P2.

Pronóstico de rendimientos a carga máxima confiable U1500: Destilación de Aromáticos.

CARGAS/PRODUCTOS	BPD	%V	LB/PC	TON/DIA	%PESO
CARGAS					
Extracto de U-1400	2800	78	54,0	386	77
Producto de Hydeal	800	22	55,0	112	23
TOTAL CARGA	3600	100		498	100
PRODUCTOS					
Benceno	720	20	55,1	101	20
Tolueno	568	16	54,1	78	16
Tolueno a U1600	800	22	54,1	110	22
M-P Xilenos	972	27	53,5	133	27
O-xileno	180	5	54,5	25	5
Aromáticos pesados	360	10	54,1	50	10
TOTAL PRODUCTOS	3600	100		498	100

De presentarse operación de U1600 Hydeal, solo se contempla operación de U1300 con naftas debutanizadas y vírgenes según programación y demanda de Benceno y Tolueno.

Tabla P3.

Pronóstico de rendimientos a carga máxima confiable U1600: Hydeal.

Cargas/Productos	BPD (KPCED)	%V	LB/PC	TON/DIA	%PESO
CARGAS					
Tolueno	800	81	54,10	110	58
Gas D1304 a Hydeal (80% H2)	(5500)	-	0,02	55,0	29
Benceno de U1700	188	19	55,10	26	14
TOTAL	988	100		192	100
PRODUCTOS					
Benceno	492	62	55,10	69	36
Tolueno	308	39	54,10	43	22
Gas a U-1700 (60% H2)	(5350)	-	0,03	76,6	40
Gas a Fuel Gas (18% H2)	(150)	-	0,06	4,1	2
TOTAL	800	100		192	100

Para el caso de operación de U-1700 Hydrar recuperada la confiabilidad de los tres reactores se presentan los rendimientos esperados bajo este escenario mediante la tabla P4.

Tabla P4.

Pronóstico de rendimiento a carga máxima confiable U-1700: Hydrar.

CARGAS/PRODUCTOS	BPD (KPCED)	%V	LB/PC	TON/DIA	%PESO
Cargas ¹					
Benceno a Reactores	550	75	55,10	77	43
Benceno de Lavado	188	25	55,10	26	15
Gas de Hydeal	5350	-	0,03	76,6	42
Total cargas	738	100		180	100
Productos					
Ciclohexano	715	79	48,63	89	49
Benceno a Hydeal	188	21	55,10	26	15
Gas a G.C. (40% H2)	2675	-	0,05	64,4	36
Total productos	903	100		180	100

¹ Con disponibilidad de tres reactores e inyección de 2 MPCED de H2 adicional de alta pureza (H2: 95 %. CO máx. 10 ppm. CO2 máx. 25 ppm). Para la operación con dos reactores desde el año 2015 solo se puede alcanzar 150-180 bpd como carga total con un rango de pureza del ciclohexano 90-95% peso.