

**Evaluación de la factibilidad operacional del cargue de Slurry en la torre de vacío t-205 de la u200 como iniciativa para la reducción de la producción de combustóleo en la refinería de Barrancabermeja.**

**Angie Lizeth Pérez Rueda**

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

**Director**

**Hernando Guerrero Amaya**

**PhD. FiDiPro**

**Codirector**

**Juan Carlos Arias Molina**

**Ingeniero Químico**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de ingenierías fisicoquímicas**

**Escuela de ingeniería química**

**Bucaramanga**

**2020**

### Agradecimientos

A mi familia, gracias por ser mi motor en tiempos difíciles, por enseñarme lo que es el amor, el respeto y la honestidad. Todo lo que soy es por ustedes y para ustedes.

A mis amigos, gracias por su paciencia y aliento durante estos 5 años, por sus risas en momentos de celebración y por permitirme ver su lado más vulnerable; saben que los admiro por su inteligencia, solidaridad y calidad humana. Por siempre, los quiero.

A Natalia, Luisa y Daniela por ser mis primeras amigas en la UIS, por estar a mi lado y luchar hasta el final durante primer semestre. Sin duda alguna, esa etapa no hubiera sido igual sin su compañía.

A mis compañeros de prácticas en Ecopetrol, por en tan poco tiempo regalarme tantos momentos de alegría, por ser mi círculo de apoyo cuando los resultados no eran los esperados y por enseñarme que un ambiente laboral puede ser divertido. Extraño su compañía diaria, espero verlos pronto y muchos éxitos en sus vidas.

Al profesor Hernando Guerrero, por brindarme la oportunidad de incursionar en la docencia, por su disposición siempre ante cualquier duda y por ser un excelente profesor, gracias por su dirección en todo momento.

A todos los ingenieros de la coordinación de procesos de la refinería de Barrancabermeja, gracias por permitirme aprender de ustedes, por sus críticas constructivas y por los momentos de esparcimiento. A los ingenieros Juan Carlos Arias y Hamilton Cañas muchas gracias por confiar en mi trabajo, por desafiarme a nuevos retos y por sus comentarios de aliento.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Marco Teórico.....	14
1.1 Aprovechamiento de Slurry en la GRB .....	16
1.2 Descripción general del proceso en la unidad 200.....	17
2. Objetivos .....	21
2.1 Objetivo general.....	21
2.2 Objetivos específicos .....	21
3. Alcance .....	22
4. Metodología .....	22
5. Resultados .....	26
5.1 Caso base de estudio .....	26
5.2 Evaluación técnica para el procesamiento de Slurry en la torre de vacío 205.....	29
5.3 Análisis de corrientes de entrada .....	29
5.4 Análisis de variables operacionales .....	30
5.4.1 Variables a manipular .....	30
5.4.2 Variables a controlar .....	31
5.4.3 Influencia del flujo de Slurry procesado.....	32
5.4.4 Influencia del vapor de despojo. ....	34

---

5.4.5 Influencia de la variación en el API del Slurry de carga. ....	36
5.5 Implicaciones del procesamiento de Slurry en la torre 205 .....	38
5.6 Análisis hidráulico .....	39
5.6.1 Sistema de carga. ....	40
5.7 Definición de adecuaciones y facilidades necesarias.....	42
6. Conclusiones .....	44
7. Recomendaciones .....	46
Referencias Bibliográficas .....	47
Apéndices.....	49

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema general de la torre de vacío T-205 -Fuente: adaptado de manual de procesos U200.....	18
Figura 2. Ruta metodológica implementada- Fuente: elaboración propia .....	23
Figura 3. Curvas de destilación gasóleos de vacío A) Gasóleo pesado de vacío B) Gasóleo liviano de vacío .....	27
Figura 4. Resultados obtenidos en la simulación del caso base Vs. Reportes de laboratorio.....	28
Figura 5. Configuración utilizada en el software Aspen Hysys.....	31
Figura 6. Configuración del sub-flowsheet utilizado en el software Aspen Hysys .....	32
Figura 7. Influencia del Slurry en los fondos de vacío (5145 lb/h de vapor de despojo) A) °API y viscosidad de FDV B) IBP de FDV .....	33
Figura 8. Flujo de Slurry Vs. °API de gasóleos de vacío (5145 lb/h de vapor de despojo) .....	34
Figura 9. Influencia del vapor de despojo (2,5 KBPD de Slurry) en A) Rendimiento del Slurry B) Calor cedido en E-233 .....	34
Figura 10. Influencia del vapor de despojo (2,5 KBPD Slurry) en A) Densidad API del GPV B) IBP de los fondos de vacío.....	35
Figura 11. Variación del °API con respecto al flujo y tipo de Slurry en A) Gasóleo pesado de vacío B) Fondos de vacío.....	37
Figura 12. Circuitos de cargue de Slurry a T-205.....	41

---

Figura 13. Circuito de fondo T501 .....	43
Figura 14. Boquilla 4N en plano mecánico de T-205 .....	51
Figura 15. Curvas de destilación D1160 para el Slurry de Orthoflow.....	53
Figura 16. Circuito de cargue del crudo reducido a T-205 (caso base) .....	57
Figura 17. Resultados Inplant- Flujo de slurry fijo en 2,5 KBPD .....	58
Figura 18. Resultados Inplant-presión de Slurry fija en 80 psi.....	59
Figura 19. Dimensionamiento de válvula requerida en alternativa 1 .....	60
Figura 20. Dimensionamiento de platina de orificio .....	60
Figura 21. Circuito de cargue de Slurry a LV208A.....	61
Figura 22. Circuito de cargue de Slurry por medio de a boquilla 4N.....	62
Figura 23. Dimensionamiento de válvula requerida para la alternativa 2 .....	63

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Configuración de la torre de vacío T-205 .....	19
Tabla 2. Caracterización de productos generados en T-205 .....	26
Tabla 3. Condiciones de diseño Bombas P-526.....	40
Tabla 4. Caracterización del Slurry de Orthoflow .....	53
Tabla 5. Análisis SARA para el Slurry de Orthoflow .....	54
Tabla 6. Parámetros hidráulicos del cargue de Slurry al LV208A .....	61
Tabla 7. Parámetros hidráulicos para el cargue de Slurry por medio de la boquilla 4N (línea de 3").....	64
Tabla 8. Presupuesto para la implementación del procesamiento de Slurry en T-205 .....	71

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Alternativas de cargue para el procesamiento de Slurry en T-205 .....	49
Apéndice B. Caracterización analítica del Slurry .....	53
Apéndice C. Análisis hidráulico .....	55
Apéndice D. Limitaciones operacionales en la unidad 500 (Orthoflow) por el procesamiento de Slurry en la T-205 .....	66
Apéndice E. Beneficios esperados .....	70

## Resumen

**Título:** Evaluación de la factibilidad operacional del cargue de Slurry en la torre de vacío t-205 de la u200 como iniciativa para la reducción de la producción de combustóleo en la refinería de Barrancabermeja\*.

**Autora.** Angie Lizeth Pérez Rueda\*\*

**Palabras Claves:** Slurry, destilación, combustóleo, modelación.

Ecopetrol S.A es la primera empresa petrolera de Colombia y una de las cinco más grandes de América Latina. Esta empresa posee dos complejos industriales ubicados en las ciudades de Barrancabermeja y Cartagena. La refinería de Barrancabermeja corresponde a un complejo de conversión media (86%) y durante el procesamiento del crudo genera 32 KBPD de un residuo con alto contenido de azufre denominado “Slurry”. El Slurry es destinado en su totalidad a la preparación de combustóleo, producto cuyo mercado no es prometedor debido a su bajo valor de comercialización y a nuevas regulaciones ambientales que exigen la disminución en su contenido de azufre. En este sentido, iniciativas como el procesamiento de Slurry en la torre de vacío 205 son requeridas en la empresa para el aprovechamiento del mismo. En este trabajo se realizó el modelamiento de la operación en la torre 205 para el procesamiento de Slurry, y se determinó que la implementación de la iniciativa representa una disminución en 2,5 KBPD de combustóleo y un aumento en la producción de asfalto y gasóleo pesado de vacío. De igual forma, se establecieron los requerimientos y adecuaciones necesarias en la iniciativa, para concluir que la alternativa en mención se consolida como viable en términos operativos y representa un escenario favorecedor en el ámbito económico con un beneficio esperado de 18 MUSD/año.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Química Director Hernando Guerrero Amaya PhD.  
FiDiPro Codirector Juan Carlos Arias Molina Ingeniero Químico

## Abstract

**Título:** Evaluation of the operational feasibility for the processing of slurry in the vacuum tower T-205 from U200 as an initiative for the reduction of fuel oil production in Barrancabermeja refinery\*.

**Autora.** Angie Lizeth Pérez Rueda\*\*

**Palabras Claves:** Slurry, distillation, fuel oil, modeling.

Ecopetrol S.A is the first oil company in Colombia and one of the biggest in Latino America. The company has two refineries located at Barrancabermeja and Cartagena cities. The Barrancabermeja refinery has a medium conversion (86%) and during the treatment of the crude oil it produced 32 KBPD of a residue with a high content of sulfur called "Slurry". The Slurry is addressed for the fuel oil blending, which forecast is not promising due to the low marketing value and new environmental regulations that demand the diminution of the sulfur content in this product. In this way, alternatives like the Slurry processing in vacuum columns are required in the company. In this work it could be seen the modeling for the operation in the T-205 column for the slurry treatment, also it was found that this initiative represents a reduction of 2,5 KBPD in fuel oil production. On the other hand, it was also established the requirements for the start-up of the initiative, determining the viability of the alternative in operative and economic terms, with a benefit of 18 MUSD per year.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Química Director Hernando Guerrero Amaya PhD.  
FiDiPro Codirector Juan Carlos Arias Molina Ingeniero Químico

## Introducción

Ecopetrol S.A. es la empresa más grande de Colombia con una utilidad neta de \$15,4 billones registrada en 2011. La empresa desarrolla actividades de exploración, producción, refinación, transporte y comercialización de crudo y de los productos obtenidos. Con respecto al área de refinación, cuenta con dos complejos (Barrancabermeja y Cartagena) donde se procesan crudos de varias calidades para generar diferentes compuestos requeridos por el mercado nacional e internacional (Ecopetrol, 2014).

En la refinería de Barrancabermeja existen cuatro Unidades de craqueo catalítico: Orthoflow, Modelo IV, UOP I y UOP II. El craqueo catalítico es un proceso en el cual las moléculas complejas de hidrocarburos se convierten en cadenas más cortas y livianas por medio de la intervención de un catalizador zeolítico. En estas unidades además de producir compuestos de alto valor agregado se genera un residuo con alto contenido de azufre denominado “Slurry”, destinado en su totalidad a la preparación de combustóleo o fuel oil, producto utilizado como combustible marítimo, que genera pérdidas en la empresa al tener un valor de comercialización menor al del crudo (Ecopetrol, n.d.-a).

Sumado a lo anterior, la organización marítima internacional (IMO, por sus siglas en inglés) expone una nueva normatividad que exige una reducción en el contenido de azufre del combustóleo para el 2020 (*El límite mundial de contenido de azufre de 2020*, n.d.). Cumplir con estos nuevos límites conlleva un impacto económico debido a la cantidad de diluyentes o procesos requeridos para alcanzar las concentraciones permitidas. En este escenario, uno de los objetivos

de la gerencia de la refinería de Barrancabermeja (GRB) para minimizar el impacto económico en la empresa es disminuir desde 32 KBPD a 20 KBPD la producción de combustóleo.

Para lograr el objetivo propuesto se analizan diferentes alternativas que permitan el aprovechamiento y refinación del Slurry por medio de la adaptación de configuraciones ya existentes para reducir costos de inversión. Este proyecto contempla la elaboración de la factibilidad operacional del procesamiento de Slurry en la torre de destilación al vacío T-205, a través de la simulación de la planta en un software especializado, la definición de condiciones de operación y de facilidades requeridas para su correcto funcionamiento.

## **1. Marco Teórico**

La destilación es una operación unitaria que se basa en la diferencia de volatilidad de los componentes, permitiendo separar cortes de una mezcla de hidrocarburos complejos como el petróleo. De forma general, el fraccionamiento del crudo comienza con el procesamiento de la materia prima en una torre de destilación atmosférica, donde se obtienen combustibles como naftas, jet A1 y ACPM. De igual manera, por el fondo de la torre se obtiene un crudo reducido que posteriormente es orientado como alimentación a una torre de destilación al vacío para su procesamiento (Fahim, Al-Sahhaf, & Elkilani, 2010).

El crudo reducido contiene en su mayoría componentes pesados que requieren altas temperaturas para lograr su fraccionamiento. Sin embargo, para evitar la descomposición térmica de las moléculas, la torre de vacío trabaja con presiones reducidas, lo que permite operar con

temperaturas elevadas sin superar el límite de descomposición térmica (*Procesos de destilación atmosférica de crudos y al vacío*, 2007).

En las unidades de destilación se encuentran de forma regular dos tipos de torres de vacío: combustible y lubricante. Los principios de operación de ambos equipos son similares; con la diferencia de que la torre de lubricantes demanda condiciones de operación más severas y una cantidad de platos superior debido a los requerimientos en las especificaciones de estos productos. En las torres de vacío de combustible, se procesa el crudo reducido para generar gasóleos y una corriente de fondo. Los gasóleos son enviados a unidades de conversión, como craqueo catalítico, para ser transformados en productos de mayor valor como gasolina. Los fondos de vacío se orientan a diferentes procesos como extracción líquido-líquido, preparación de crudos reconstituidos y asfalto (Ruiz, Vega, Martínez, & Erdmann, 2013).

Anteriormente en la empresa, los fondos de vacío eran orientados de igual forma a la preparación de combustóleo. Sin embargo, en función de incrementar la rentabilidad de la refinería, se realizaron modificaciones en el procesamiento de este subproducto para optimizar su uso en productos más valiosos. Actualmente, en la preparación de combustóleo (de alto azufre) se emplean únicamente 3 compuestos, Slurry proveniente de craqueo catalítico, brea producto de la viscorreductora y diluyentes como el aceite liviano de ciclo (ALC).

Se resalta que las unidades de cracking catalítico, al enviar la totalidad del Slurry a la preparación de combustóleo, están incrementando los niveles de producción de un combustible cuyo mercado no es prometedor (López, 2015). Debido a esto, la necesidad de disminuir el Slurry destinado a la producción de este combustible está en constante crecimiento.

Por otro lado, la entrada en vigor de MARPOL 2020 representa un cambio radical en el escenario de los combustibles marítimos. Esta nueva normatividad exige una reducción del 85%

en el contenido de azufre del combustóleo para Enero del 2020 (International Maritime Organization. Marine Environment Protection Committee, n.d.). En este escenario, se hace necesario buscar alternativas de aprovechamiento del Slurry (rico en azufre y metales) para evitar utilizar altas cantidades de este compuesto que aumenta los niveles de producción y dificulta alcanzar las especificaciones en la preparación de combustóleo. En este orden de ideas, aunque las unidades se encuentren operando de forma estable, surge la necesidad de un ajuste a los procesos ante la oportunidad de aportar de forma positiva a la situación en mención.

### 1.1 Aprovechamiento de Slurry en la GRB

Una de las iniciativas que se encuentra actualmente en operación para el aprovechamiento del Slurry es el cargue del mismo desde los tanques de almacenamiento a 155 °F hacia la unidad de desasfaltado con propano (DAP). El proceso consiste en una extracción líquido-líquido del Slurry con propano como solvente, para separar un líquido de composición similar a un gasóleo (denominado Slurry desasfaltado o SDA) del material asfáltico y aromático (Ecopetrol, 2010) (Suárez, 2018). Posteriormente, la corriente de fondo es utilizada en una relación 50%-50% junto con el Slurry para producir AROTAR<sup>1</sup>.

Sin embargo, durante el procesamiento de Slurry en la unidad DAP, se han presentado erosiones y daños importantes en las líneas de conexión y en los equipos involucrados. Lo anterior, debido al arrastre de impurezas sólidas producto del desprendimiento del catalizador. Por esta

---

<sup>1</sup> AROTAR: nuevo producto en la refinería conformado por 50% fondos DAP y 50% Slurry; su composición corresponde principalmente a hidrocarburos policíclicos aromáticos y se comercializa como materia prima en la generación de humo negro (*Línea de productos industriales-Ecopetrol*, 2019).

razón, se resalta que se hace indispensable la implementación de filtros para la corriente de Slurry antes de ingresar a cualquier proceso seleccionado.

De igual forma, durante la búsqueda de alternativas para alcanzar el objetivo de la disminución de fuel oil, se ha contemplado la posibilidad de orientar una corriente de Slurry hacia la línea de alimentación de la torre de vacío T-205 en la unidad 200. Este trabajo entregará un análisis de la viabilidad operacional de esta alternativa y de las condiciones óptimas de operación.

## **1.2 Descripción general del proceso en la unidad 200**

La unidad 200 corresponde a una destilación combinada con una carga normal de 82.000 BPD de crudos con características entre 22 y 32 °API. Se compone por dos secciones principales: la sección de destilación atmosférica con la torre T-201 y la sección viscorreductora con las torres T-204 y T-205, que actualmente trabajan como equipos de destilación atmosférica y de vacío combustible, respectivamente.

El proceso en la unidad 200 comienza cuando el crudo ingresa al primer tren de intercambio de calor cuyo objetivo es elevar la temperatura para asegurar la correcta operación en el desalador, en este equipo la mezcla es despojada de las impurezas y sales para evitar problemas en la operación. Posteriormente, el crudo ingresa al segundo tren de intercambio de calor para alcanzar la temperatura de entrada al horno 202, donde se garantizan las condiciones de alimentación a las torres atmosféricas. En las torres T-201 y T-204 se obtienen cortes de combustibles como naftas, jet A1 y ACPM, y de igual manera, por el fondo se obtiene un crudo reducido que es orientado al sistema de control LV-208A, para posteriormente cargarlo a la torre de destilación al vacío T-205 por medio de una línea de transferencia.

Para lograr la presión de vacío al interior de la torre (19 mmHg), se disponen de eyectores de vacío ubicados en etapas consecutivas, la base de funcionamiento de estos equipos es el principio de Venturi. El proceso consiste en inyectar vapor de alta presión a un difusor, donde el vapor se acelera a medida que el difusor se vuelve más estrecho, y al incrementar la velocidad, su presión disminuye (“Descripción general del proceso U200,” 2007).

En la industria, de forma general, la alimentación de una torre de vacío es previamente sometida a un calentamiento donde se lleva a una temperatura suficiente para su vaporización (*Procesos de destilación atmosférica de crudos y al vacío*, 2007). Sin embargo, debido a la configuración inicial como viscorreductora; entre la torre T-204 y T-205 no existe un horno para dicho calentamiento. Por lo anterior, no se suministra energía térmica adicional para facilitar el cambio de fase, lo que repercute en que la eficiencia de esta torre es menor en comparación con otros equipos destinados a la misma operación.

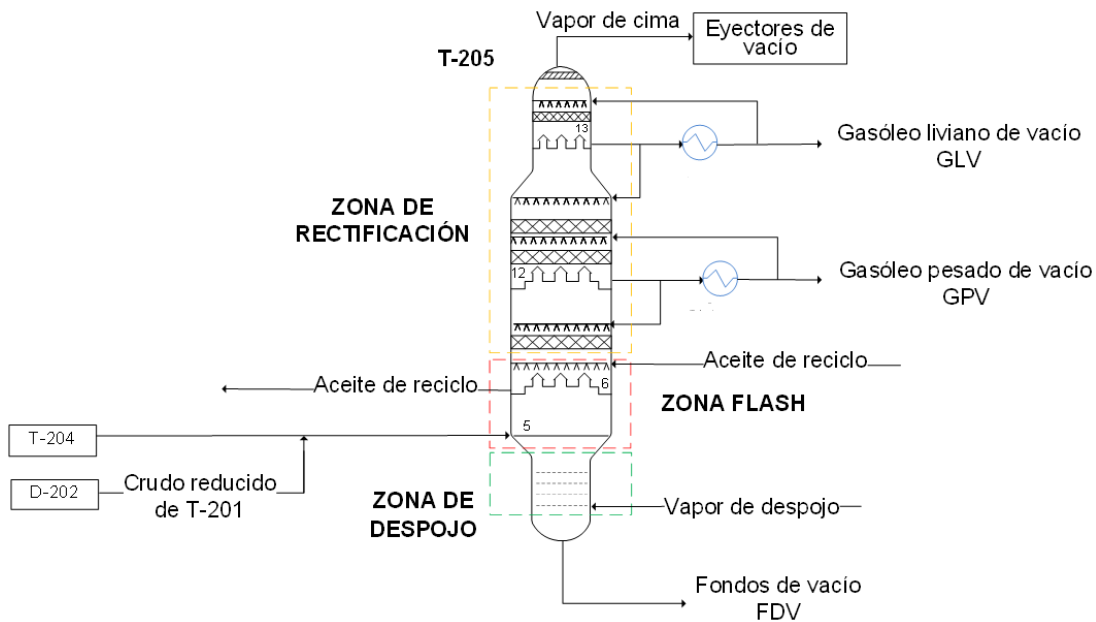


Figura 1. Esquema general de la torre de vacío T-205 -Fuente: adaptado de manual de procesos U200

En la figura 1 se observa un esquema de la torre de vacío de la unidad 200 donde se identifican tres secciones: la zona flash, la zona de despojo y la zona de rectificación. La parte intermedia corresponde a la zona flash, con un diámetro de 14 ft, por donde ingresa el crudo reducido a través de una línea de transferencia de 36 in. En esta zona el crudo experimenta una drástica caída de presión, que obliga a la corriente a liberar energía por medio del cambio de fase vapor de los componentes más livianos hasta alcanzar el equilibrio. La parte vaporizada asciende por la torre mientras la parte líquida por acción de la gravedad va hacia la zona de despojo en los platos del fondo.

La zona de despojo corresponde a la parte inferior y de menor diámetro (8 ft) de la torre, donde se recuperan livianos aún contenidos en el líquido por medio de una inyección de vapor de 50 psi. Por último, la zona de rectificación donde se ubican 4 lechos empacados tipo Gempack de material SS 316 L 1/8". En esta zona se obtienen como producto gasóleos de vacío, y de igual forma, por medio de dos sistemas de enfriamiento laterales se regula la fase líquida en la torre a través de la recirculación de corrientes de gasóleo pesado de vacío (GPV) y gasóleo liviano de vacío (GLV) (Ecopetrol, n.d.-b).

Tabla 1.

Configuración de la torre de vacío T-205 -Fuente: adaptado de hoja de especificación torre 205

Parámetro		Descripción
Platos <sup>2</sup>	1-4	Zona de despojo
	5-6	Zona flash
	7-11	Zona de lavado
	12-13	Colectores
Lechos (GemPack) <sup>2</sup>	1-2	Fraccionamiento-lavado GPV (67,52 y 62,6 in de alto)

<sup>2</sup> Numeración de fondo a cima

Parámetro	Descripción
3-4	Fraccionamiento-lavado GLV (73,03 y 57,87 in de alto)
Tipo de condensador	Sin condensador, el GLV del sistema de retiro de calor lateral E-214AB retorna a la cima
Tipo de rehervidor	Sin rehervidor, inyección directa de vapor de 50 psi

La torre de destilación T-205 tiene una altura de 95.5 ft y una capacidad máxima de 18,5 KBPD. Actualmente, procesa alrededor de 12 KBPD y la corriente de entrada se compone del crudo reducido obtenido en la torre T-204 y en menor medida, según disponibilidad, fondos de la T-201 cargados desde el D-202. En la tabla 1 se observan los parámetros de configuración junto con la estructura de entrada y salida de la torre.

Con respecto a las corrientes de salida en la torre, es de resaltar que los fondos de vacío son orientados en su totalidad a la preparación de asfalto; por otro lado, por el primer corte lateral se obtiene GLV y por el segundo corte GPV; productos utilizados como alimentación en las unidades de craqueo catalítico fluidizado (FCC) para su conversión en productos valiosos como gasolina.

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Evaluar la factibilidad operacional del cargue parcial de Slurry a la torre de vacío T-205 de la U200 para la reducción de la producción de combustóleo en la refinería de Barrancabermeja.

### 2.2 Objetivos específicos

- Modelar la torre de vacío T-205 bajo las condiciones actuales del proceso utilizando software especializado.
- Encontrar los valores adecuados de las condiciones de operación en función del rendimiento de gasóleos para el cargue de Slurry a la torre T-205.
- Identificar las adecuaciones y facilidades necesarias para procesar Slurry en la torre de vacío.

### **3. Alcance**

Determinar la viabilidad operativa del procesamiento de Slurry en la torre de vacío 205 de la refinería de Barrancabermeja, por medio de la modelación de la operación y la evaluación de la factibilidad de la iniciativa en la empresa Ecopetrol S.A.

### **4. Metodología**

Para el cumplimiento a cabalidad de los objetivos propuestos se plantea el desarrollo de 3 etapas con diferentes actividades secuenciales:

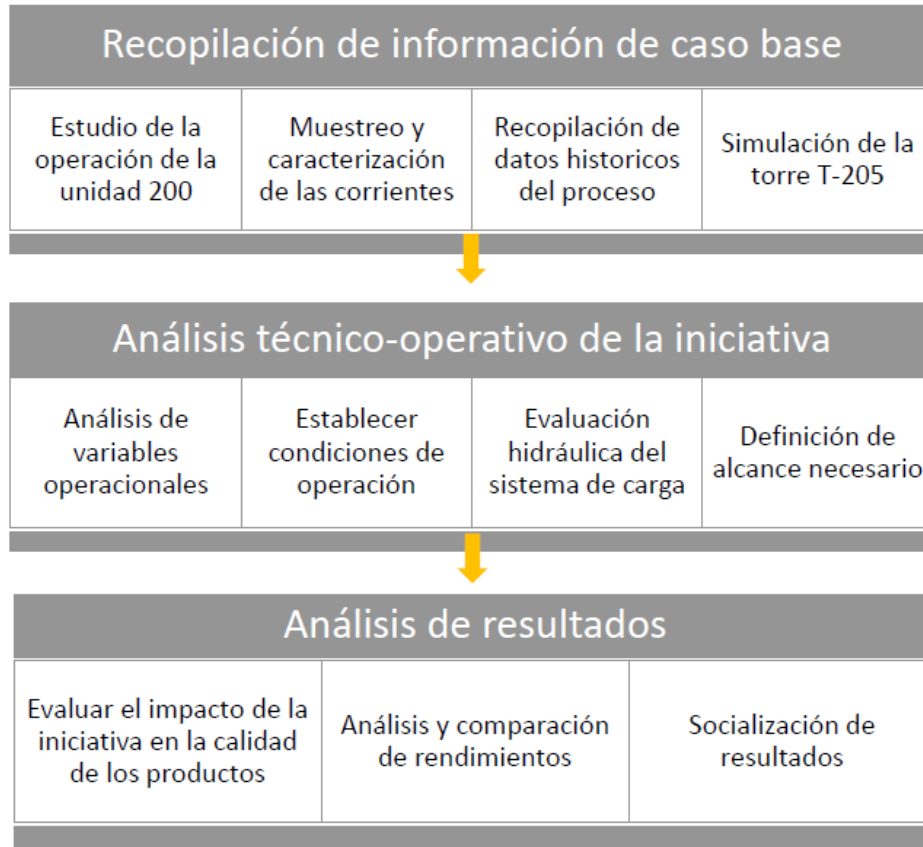


Figura 2. Ruta metodológica implementada

**Primera etapa:** Recopilación de información del caso base (en función del primer objetivo)

**Actividad 5.1:** Estudio de la operación de la unidad 200

Con el fin de conocer a detalle el proceso que se realiza en la unidad 200 se realizó un estudio preliminar de la operación por medio de una revisión bibliográfica, una lectura de los manuales de operación y una revisión de los diagramas, tablas de datos (datasheets) y planos de la unidad. De igual forma, fue necesario realizar una validación de los diagramas del proceso a través de una visita de inspección visual a la planta.

**Actividad 5.2:** Recopilación de datos históricos del proceso

Se recopilaron los datos históricos de condiciones de operación en periodos estables de la unidad en el último año junto con los valores de producción (flujo, temperatura, presión) de todas las corrientes involucradas en el proceso a través del software PIDataLink.

**Actividad 5.3:** Muestreo y caracterización de las corrientes de la torre T-205

Luego de identificar las corrientes involucradas en la estructura entrada-salida de la torre, se realizó el muestreo y la caracterización analítica para obtener la información base de las corrientes implicadas en el proceso (GPV, GLV, FDV y Slurry). Se solicitó la información de curvas de destilación, grado API, carbón Conradson y análisis SARA de todas las corrientes involucradas. De igual forma, para la corriente de fondo se solicitó la prueba de penetración y pérdida de masa, ya que son requerimientos para la preparación de asfalto.

**Actividad 5.4:** Desarrollo de la simulación de la torre T-205 y validación del modelo obtenido.

Se modeló la destilación al vacío en la torre T-205 bajo las condiciones actuales de la operación en el software Aspen Hysys V10. Seguidamente, se validaron los resultados obtenidos en la corrida del modelo simulado con los datos históricos del proceso.

**Segunda etapa:** Análisis técnico y operativo de la iniciativa (en función del segundo objetivo propuesto)

**Actividad 5.5:** Análisis de variables operacionales

Se realizaron modificaciones en el modelo obtenido para estudiar la respuesta del proceso ante el cargue de Slurry a la torre 205. Posteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad de las variables de interés a partir de casos de estudio con el fin de observar el comportamiento de la torre.

**Actividad 5.6:** Encontrar los valores adecuados de las condiciones de operación

Se definieron las condiciones de operación más favorables, en función del rendimiento de gasóleos, para el procesamiento de Slurry en la torre T-205 a partir de los resultados obtenidos en la actividad anterior.

**Actividad 5.5:** Evaluación hidráulica del sistema de carga de la torre T-205

Por medio de un software especializado (inplant) se encontró que la hidráulica del sistema existente soporta las nuevas condiciones de operación.

**Actividad 5.8:** Definir el alcance necesario

Se identificó que para la implementación de la alternativa se hace necesario la instalación de un nuevo sistema de control en la línea de Slurry, de igual forma, se establecieron los parámetros de las nuevas facilidades requeridas en el sistema.

**Tercera etapa:** Análisis de resultados

**Actividad 5.9:** Evaluar el impacto del procesamiento de Slurry en la calidad de los productos obtenidos

Se realizó una comparación de los datos obtenidos para los productos generados en el caso base y los resultantes de la destilación con cargue parcial de Slurry.

**Actividad 5.10:** Analizar los rendimientos obtenidos por medio del procesamiento de Slurry en la torre T-205

Comparar los rendimientos de gasóleos y de fondos de vacío obtenidos en el caso base y con la implementación de la iniciativa.

**Actividad 5.11:** Socialización de resultados

## 5. Resultados

### 5.1 Caso base de estudio

Inicialmente se realizó una revisión del sistema actual para observar las características de los fondos y de los gasóleos generados en la torre T-205, para lo cual se analizaron muestras de los productos en el laboratorio de la GRB; los resultados se presentan a continuación:

Tabla 2.

*Caracterización de productos generados en T-205*

<b>PROPIEDAD</b>	<b>GLV</b>	<b>GPV</b>	<b>FDV</b>
Gravedad API [°API]	24,75	17,99	13,31
Carbón Conradson [%peso]	0	1,07	17,51
Azufre Horiba [ppm]	0,7546	1,227	1,0313
Viscosidad a 40°C [cSt]	8,5	245,9	-
Insolubles n-heptano [%peso]	0	0,54	14,72
Número de bromo [%peso]	57,23	71,56	-
Punto de Inflamación [°C]	-	-	286
Punto de ablandamiento [°F]	-	-	110,7
Pérdida de masa RTFOT [% m]	-	-	204,8533
Penetración a 25°C [mm/10]	-	-	92,3

Seguidamente, con el fin de estudiar el proceso y predecir tendencias en la torre 205, se desarrolló la simulación de la operación en el software Aspen Hysys V10. En primera instancia, se extrajeron los datos históricos del último año reportados en el software PIDataLink,

seguidamente se utilizaron las condiciones actuales del proceso y con estos valores se simuló la operación. El paquete termodinámico seleccionado para esta operación fue Peng Robinson, ya que presenta un buen ajuste a bajas presiones y es el paquete recomendado para compuestos hipotéticos de hidrocarburos en la operación unitaria requerida en este caso (destilación al vacío) (Coker, 2018).

La torre de vacío se simuló en dos torres, en primera instancia un destilador flash que corresponde a la zona de carga y seguidamente una torre de 8 platos que representan la zona de rectificación con los platos superiores y la zona de despojo con el plato inferior; ubicado por debajo de la entrada de la corriente proveniente del flash.

Seguidamente, y con el fin de validar la confiabilidad de la simulación realizada, se tomaron los datos reportados por el laboratorio de la GRB y se compararon con los valores obtenidos en la simulación del caso base. En la figura 3 se presentan las curvas de destilación obtenidas en el laboratorio contrastadas con las curvas TBP generadas por Aspen Hysys; se resalta que las temperaturas reportadas presentan en promedio porcentajes de error menores al 7%.

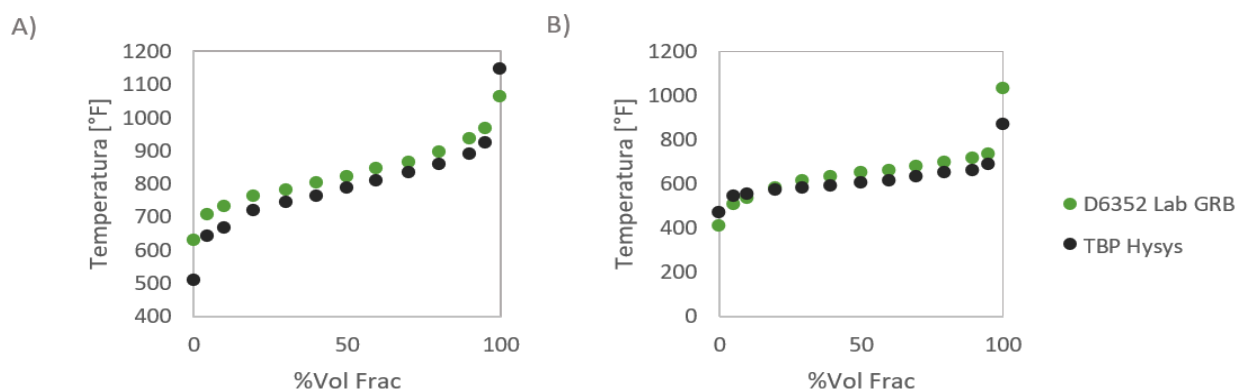


Figura 3. Curvas de destilación gasóleos de vacío A) Gasóleo pesado de vacío B) Gasóleo liviano de vacío

De igual forma, en la figura 4 se aprecia que las diferencias más significativas se obtienen para el grado API de los productos generados (13%), esto ocurre debido a que no se cuenta con la caracterización del crudo reducido de carga, en este sentido, se obligó a utilizar resultados aproximados arrojados por la simulación de la torre 204.

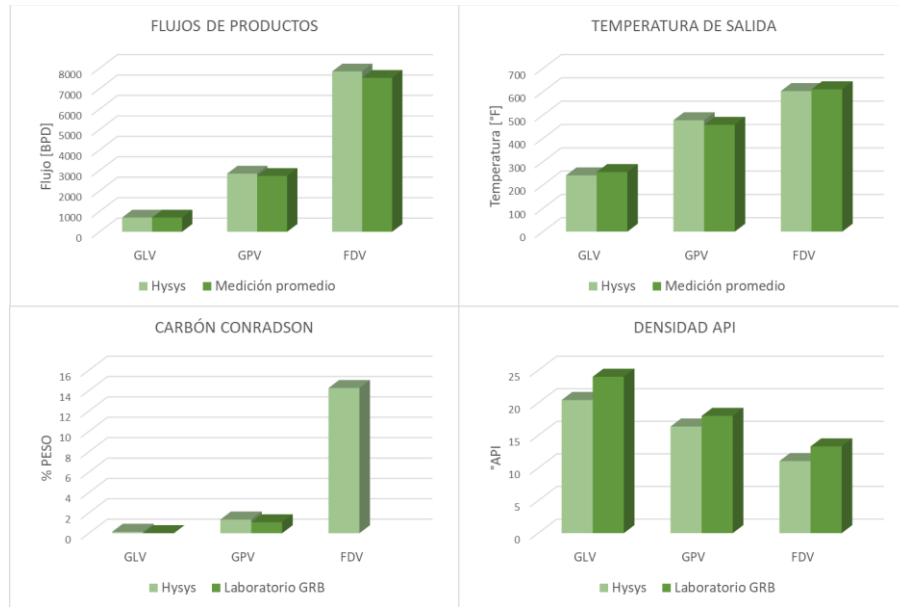


Figura 4. Resultados obtenidos en la simulación del caso base Vs. Reportes de laboratorio

Las diferencias de los valores reportados para el grado API presentan una limitación en el modelo, es por esto, que en este documento los resultados se basarán en un análisis de la tendencia de esta propiedad, por medio del delta obtenido en el caso base con respecto al obtenido para el procesamiento de Slurry.

## 5.2 Evaluación técnica para el procesamiento de Slurry en la torre de vacío 205

La iniciativa consiste en el procesamiento de la totalidad del Slurry producido en cracking catalítico III (Orthoflow). Con el fin de aprovechar la energía suministrada en la operación de craqueo catalítico, el Slurry será procesado a la temperatura de salida de la fraccionadora principal (T-501). Con respecto a la torre de vacío seleccionada, se resalta que a pesar de que en la refinería existen otras unidades de destilación combinada, la unidad 200 fue la seleccionada en vista de la cercanía (120 m) con la unidad de Orthoflow. Sumado a lo anterior, debido a la configuración como viscorreductora, la torre de vacío 205 posee una metalurgia especial en su ingeniería, lo cual le otorga mayor resistencia a altas temperaturas (necesarias para el procesamiento de Slurry).

El cargue de este subproducto a la torre 205 se realizará de forma independiente por medio de una boquilla ubicada en la parte inferior de la zona flash de la torre, por lo cual el rendimiento podría presentar una disminución en comparación con el cargue a la altura óptima de la zona flash. En el apéndice A se presentan todas las alternativas de cargue consideradas, y de igual forma, los argumentos de selección para la misma.

## 5.3 Análisis de corrientes de entrada

Para realizar la evaluación técnica inicialmente se ingresaron las corrientes de entrada involucradas en la iniciativa, el crudo reducido proveniente de la torre T-204 y el Slurry proveniente de la torre T-501; con respecto al Slurry se evaluaron 2 caracterizaciones diferentes debido a la variabilidad de esta corriente en la unidad de Orthoflow, la primera con un API de 2,27 y la segunda con un

API de 7,7. En el apéndice B se muestran las propiedades y curvas de destilación del Slurry reportadas por el ICP para las dos caracterizaciones utilizadas.

#### **5.4 Análisis de variables operacionales**

La carga regular de la unidad (11,385 KBPD de crudo reducido) seguirá alimentándose según lo establecido, y de acuerdo con esta premisa se simuló el procesamiento de 2,5 KBPD de Slurry procedente de Orthoflow en la torre de vacío T-205.

El sistema propuesto se simuló con las siguientes condiciones de entrada:

- Slurry: 94.7 psia y 640°F
- Vapor de despojo: 50 psia y 790°F
- Vacío de T-205: 19 mmHg
- Crudo reducido: 11385 BPD, 34.7 psia y 611°F
- Reflujo de cima: 9986 BPD y 116°F
- Temperatura de cima-fondo: 129 °F-613°F

##### **5.4.1 Variables a manipular**

- Flujo vapor de despojo: se utilizaron valores desde el flujo del sistema original (5145 lb/h) hasta 7000 lb/h (valor máximo encontrado en datos históricos del proceso).
- Flujo de Slurry: se corrió la simulación desde 0 BPD hasta 3000 BPD de Slurry (rango de producción de Slurry en Orthoflow).





livianos presentes en el Slurry ocurre con una mejor eficiencia debido a la naturaleza de la operación y a la presión de vacío a la que se mantiene el equipo.

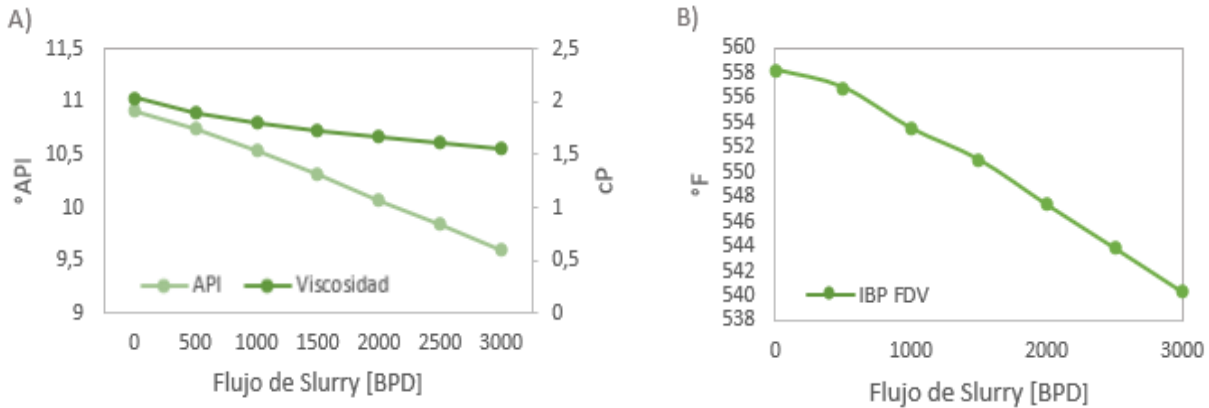


Figura 7. Influencia del Slurry en los fondos de vacío (5145 lb/h de vapor de despojo) A) °API y viscosidad de FDV B) IBP de FDV

Con respecto a la influencia del Slurry en la calidad de gasóleos de vacío se puede observar en la figura 8 que al incrementar el flujo de entrada de este compuesto (a un flujo constante de vapor) la gravedad API del GPV disminuye a un ritmo importante. Lo anterior se debe a la naturaleza de los livianos contenidos en el Slurry, que son recuperados en la corriente de gasóleo pesado.

Por otro lado, aunque la corriente de GLV presente ligeros cambios en su densidad API, el procesamiento de Slurry no tendría un impacto visible en este producto ya que la fracción de livianos despojada se direcciona en su mayoría hacia GPV y el restante a fondos. Se resalta que este producto (GLV) se seguiría manteniendo dentro de especificación para direccionarse sin ninguna restricción hacia las unidades de FCC.

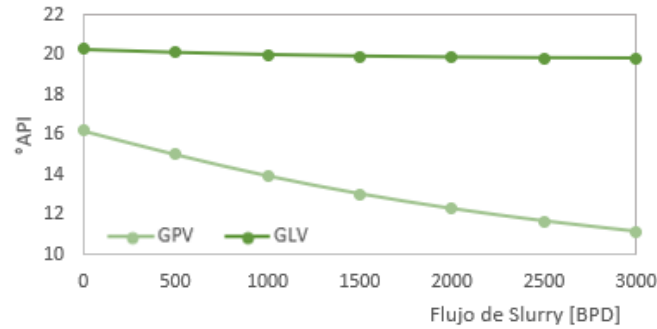


Figura 8. Flujo de Slurry Vs. °API de gasóleos de vacío (5145 lb/h de vapor de despojo)

**5.4.4 Influencia del vapor de despojo.** Para observar la influencia del vapor de despojo en el procesamiento de Slurry se realizaron diversos casos de estudio y los resultados más relevantes se observan a continuación.

En la figura 9A se observa que con el incremento del flujo de vapor se obtiene un mayor rendimiento de GPV. Sin embargo, en este escenario, para mantener la temperatura en la torre controlada y lograr condensar el producto, se hace necesario un aumento del flujo transferido en el intercambiador de retiro lateral de calor (E- 233).

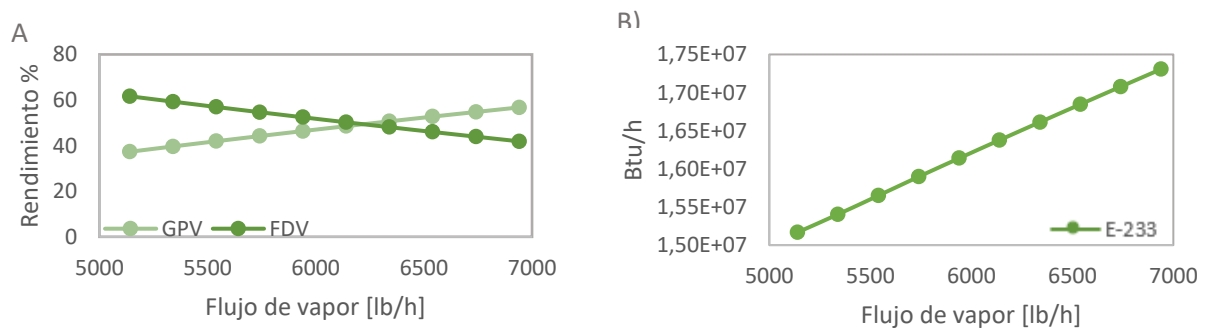
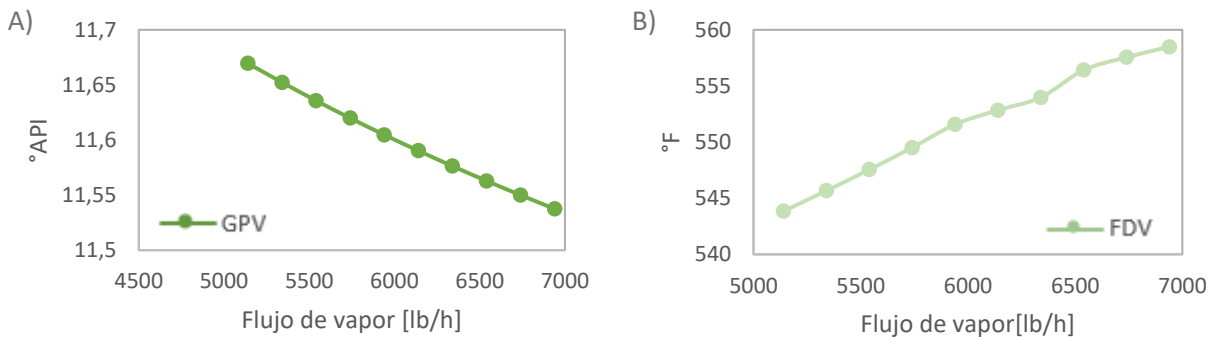


Figura 9. Influencia del vapor de despojo (2,5 KBPD de Slurry) en A) Rendimiento del Slurry B) Calor cedido en E-233

Como se aprecia en la figura 9B, para los flujos de vapor analizados el intercambiador E-233 se mantiene dentro de los límites establecidos por diseño (21 MMbtu/h); es decir, que este equipo no representa una limitante para el procesamiento de Slurry en la torre.

Con respecto a la calidad de los productos obtenidos se observa en la imagen 10A que, con el aumento del flujo de vapor, la densidad API del GPV disminuye, es decir, que para controlar la calidad de gasóleos a FCC se debe regular el flujo de vapor utilizado en el proceso. De igual forma, se debe tener en cuenta que al utilizar menos flujo de vapor el rendimiento de gasóleos se ve comprometido, especialmente porque este equipo no cuenta con una sección de precalentamiento (horno). Sin embargo, se resalta que para los flujos de vapor utilizados el delta de esta propiedad (API) no es significativo, mientras que el rendimiento de GPV si aumenta de manera considerable con el flujo de vapor utilizado.



*Figura 10.* Influencia del vapor de despojo (2,5 KBPD Slurry) en A) Densidad API del GPV B) IBP de los fondos de vacío

Por otro lado, se encontró que con el aumento del flujo de vapor, se regula la disminución del IBP de los fondos de vacío generada por el procesamiento de Slurry, por el contrario, en la imagen

10B se aprecia que con un flujo de 6940 lb/h se obtiene un IBP de igual valor que el generado con el caso base (558 °F).

En conclusión, para el caso de estudio con la corriente de Slurry de 2,27 API se encontró que el flujo de vapor máximo para obtener convergencia en la torre corresponde a 6940 lb/h, sin embargo, para asegurar un equilibrio entre rendimiento y calidad se recomienda un flujo de vapor de 6340 lb/h, con este valor se obtiene un rendimiento de GPV asociado del 50% y una disminución de 4 °F en el IBP de la corriente de fondo, lo cual no supone ningún impacto significativo en la pérdida de masa del asfalto. Sin embargo, se resalta que la corriente de GPV presentaría un delta de 4,6 °API con respecto al caso base.

**5.4.5 Influencia de la variación en el API del Slurry de carga.** Para evaluar la influencia de la variación del API en la corriente de Slurry se realizó un ejercicio equivalente al anteriormente presentado, esta vez con la segunda corriente (7,7 API); los resultados arrojados confirman que se siguen las mismas tendencias en todos los parámetros analizados. Sin embargo, se resalta que con esta corriente se obtendrían mejores rendimientos de GPV (hasta 65%) sin comprometer la integridad de la operación.

Por otro lado, como se aprecia en la figura 11, se encontró que con el procesamiento de Slurry con un API de 7,7 se obtienen corrientes con un mayor porcentaje de livianos en su composición, es decir, que al procesar Slurry con un API mayor se estaría mejorando la calidad del gasóleo de vacío obtenido en la torre. Sin embargo, la corriente de fondos presentaría una disminución de 5 °F en el IBP con respecto al caso base de estudio, y una diferencia de tan solo 1° con respecto a la corriente de fondos producto del procesamiento con Slurry de 2,27 API.

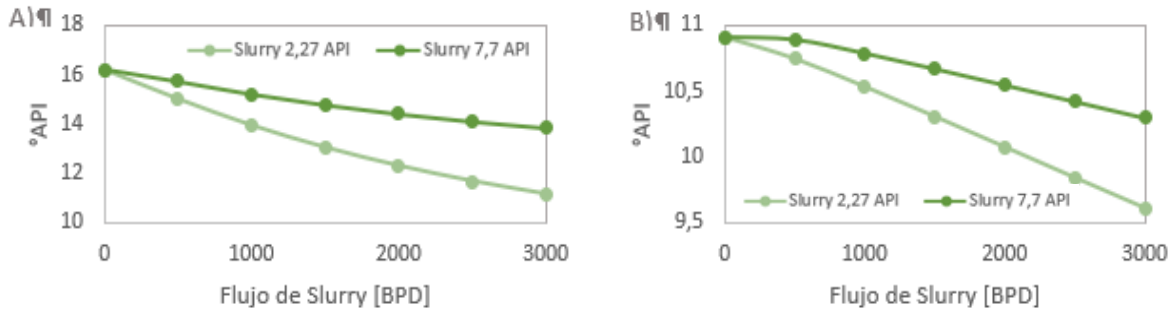


Figura 11. Variación del °API con respecto al flujo y tipo de Slurry en A) Gasóleo pesado de vacío B) Fondos de vacío

Se resalta que para el rendimiento de 50% analizado con la corriente de de 2,27 °API se obtenía un delta de 4,6° en el API de GPV con respecto al caso base; mientras que con esta corriente de Slurry (7,7 °API) se obtiene un delta de tan solo 2,3 en esta propiedad obteniendo el mismo rendimiento. En este sentido, se puede concluir que el API de la corriente de Slurry a procesar corresponde a un parámetro de influencia directa en la calidad del gasóleo obtenido en la torre 205, sin embargo, se resalta que corrientes de 7,7 API no son lo común en la unidad de Orthoflow, ya que mientras la operación se encuentre en estado estable, las corrientes de Slurry producto serán similares a la corriente de 2,27 API.

Observando los parámetros de calidad (19.5-24 API) para el cargue de gasóleos a las unidades de FCC, se puede notar que la gravedad API del GPV producto de la iniciativa (11.58-14.25) se mantendría por fuera de especificación para enviarse directamente a las unidades de craqueo catalítico. Se resalta que este producto mantendría un API comparable al del Slurry desasfaltado o SDA extraído en DAP (9,18 API), de esta manera, se debe pensar en adquirir un límite de cargue al igual que para el SDA en las unidades de FCC, especialmente por la composición de este nuevo compuesto (mayor contenido de aromáticos) que puede interferir con la correcta operación en unidades de craqueo catalítico.

### 5.5 Implicaciones del procesamiento de Slurry en la torre 205

Los beneficios esperados con la iniciativa en términos económicos se presentan en el apéndice E. Por otro lado, en materia de calidad, a partir del análisis SARA del Slurry reportado el 22 de Febrero del 2018 por el ICP (apéndice B), se observa que este compuesto es una mezcla con alto contenido de aromáticos y bajo contenido de asfáltenos y resinas; es por esto, que el asfalto obtenido a partir del procesamiento de este subproducto presentará mejores propiedades de envejecimiento debido a que esta composición le confiere propiedades antioxidantes que retardan su deterioro durante la preparación de las mezclas asfálticas y durante el tiempo de servicio en el pavimento (Puello Méndez, Afanasjeva, & Cifuentes, 2013) (Vargas & Reyes, 2010).

No obstante, una consecuencia a tener en cuenta al procesar Slurry en esta torre es la calidad de los gasóleos en materia de contenido de aromáticos y de carbón conradson. Los aromáticos son compuestos químicos con baja craqueabilidad debido a su naturaleza y esto podría llegar a generar alto contenido de estos compuestos en las corrientes involucradas. Por otro lado, el carbón conradson modifica el balance de calor en el regenerador debido al incremento en formación de Coque, ocasionando problemas en la operación y rendimiento de las unidades de craqueo catalítico (Sadeghbeigi, n.d.) (Pujro, Falco, & Sedran, 2015).

Para esclarecimiento de lo anterior, y con el fin de establecer con certeza las calidades obtenidas de los productos y la influencia del Slurry en los mismos, se decidió realizar un análisis de laboratorio; para lo cual se realizaron dos mezclas de 80%-20% y 70%-30% crudo reducido – Slurry respectivamente. Posteriormente, estas muestras se sometieron a una destilación en planta piloto para seguidamente caracterizar los cortes obtenidos y esclarecer tanto la calidad como el

rendimiento de los productos generados con esta iniciativa. Sin embargo, los resultados de la analítica no han sido reportados al momento de realizar el presente análisis de resultados.

## 5.6 Análisis hidráulico

La capacidad de la torre T-205 corresponde a un valor de 18,5 KBPD; actualmente se encuentra cargando alrededor de 12 KBPD y con una carga proyectada de 2,5 KBPD de Slurry, es decir, la capacidad de la torre no corresponde a una limitación para el sistema, ya que con el flujo propuesto no se supera la condición de diseño.

Debido a que el sistema en la unidad 200 se encuentra dentro de los valores establecidos por diseño, no se suponen problemas en la operación. Por otro lado, se hace una revisión de la bomba del circuito de Slurry en la unidad 500 (Orthoflow), ya que corresponde a un equipo que cambiaría su función, los resultados se presentan a continuación:

### **-Bomba P-526A/B**

La bomba P-526 es una bomba centrífuga que actualmente se utiliza para enviar el Slurry desde la T-501 hacia el tren de intercambio de calor; con esta iniciativa la bomba se utilizaría para enviar el Slurry desde la unidad 500 hacia la unidad 200, para lo anterior se realizó una revisión de la bomba P-526A/B y los valores reportados en la hoja de especificación del equipo se presentan a continuación:

Tabla 3.

*Condiciones de diseño Bombas P-526*

Parámetro	Unidad	P-526
H	Ft	291
Presión de succión	Psig	34,8
Presión de descarga	Psig	138,48
Temperatura	°F	700
Flujo	Gpm	136
NPSH	Ft	18,8

Se destaca que con el estudio hidráulico (apéndice C), se descubrió que con la alternativa propuesta no se hace necesario ningún cambio en la presión de descarga actual del equipo (80 psig), es decir, la bomba seguirá con las mismas condiciones de operación, y por lo tanto no supera los límites de diseño reportados para el equipo en la tabla 3.

**5.6.1 Sistema de carga.** Se procedió a realizar el análisis hidráulico de las 2 alternativas de carga más opcionadas presentadas en el apéndice A.

1. El cargue por medio de la línea de transferencia antes del sistema de control LV208A
2. El cargue por medio de la boquilla 4N.

A continuación, se observan en color rojo los dos circuitos de cargue evaluados.

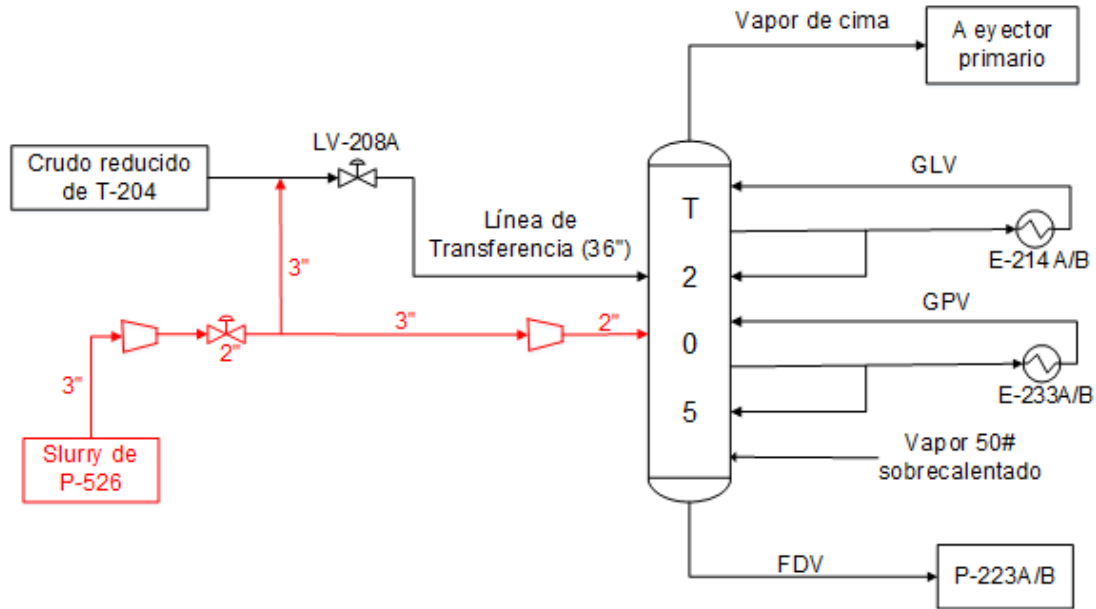


Figura 12. Circuitos de cargue de Slurry a T-205

Se resalta que la torre 205 se encuentra a una presión reducida (19 mmHg), por lo tanto, en la primera alternativa la caída de presión requerida es menor, al no realizar el cargue de forma directa a la torre. Sin embargo, debido al riesgo de erosión en la línea de transferencia por altas velocidades y presencia de sólidos suspendidos en el Slurry, se decide realizar el cargue de forma independiente. No obstante, debido a la posibilidad de un taponamiento de la boquilla 4N, se recomienda dejar instaladas las facilidades para realizar, en caso de ser requerido, el cargue del Slurry de la forma descrita en la primera alternativa.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación hidráulica, no se observa restricción para el envío de 2,5 KBPD de slurry desde la P-526 hasta la T-205. En este sentido, para un flujo de 2,5 KBPD de Slurry, se presentan valores  $> 3$  ft/s en todos los tramos de tubería, valor que se encuentra dentro del rango recomendado para evitar deposición de partículas sólidas en las tuberías. Sin embargo, las dos propuestas de cargue requieren de un nuevo sistema de control para

lograr la caída de presión necesaria para ingresar el Slurry a la torre. Para mayor profundidad del análisis realizado y especificaciones del nuevo sistema de control, dirigirse al apéndice C.

### **5.7 Definición de adecuaciones y facilidades necesarias**

En primera instancia se debe contemplar que con el fin de evitar el ingreso de sólidos del catalizador utilizado se instalará un sistema de separación de sólidos denominado hidrociclón, que permite la operación a altas temperaturas en la U-500. Sin embargo, se resalta que los lineamientos de este equipo no se contemplan en el alcance del proyecto.

Por otro lado, en la Figura 13 se observa que al enviar el Slurry desde la bomba P-526 hacia la torre 205, los intercambiadores E-523A-B y E-525, que utilizan agua de caldera y de enfriamiento quedarían por fuera del circuito principal. Por lo anterior, se debe realizar un plan para que estos equipos se encuentren disponibles en caso de ser requerida su operación en momentos de disturbios operacionales, donde la torre 205 no pueda recibir el Slurry, ya que en caso de no tener en servicio el tren de intercambio de calor, se tendría una inundación inminente con el Slurry en la fraccionadora principal de la unidad 500 (T-501 en Orthoflow). En este escenario, en el apéndice D se presentan las opciones planteadas para el procedimiento con estos intercambiadores.

De igual forma, por medio del análisis hidráulico realizado se encontró que se hace necesario una válvula de control para lograr la caída de presión necesaria del sistema, la válvula requerida es de 2 in de diámetro con un coeficiente de 25, adicionalmente, se necesita un diseño que contemple cavitación incipiente para evitar daños en el elemento.

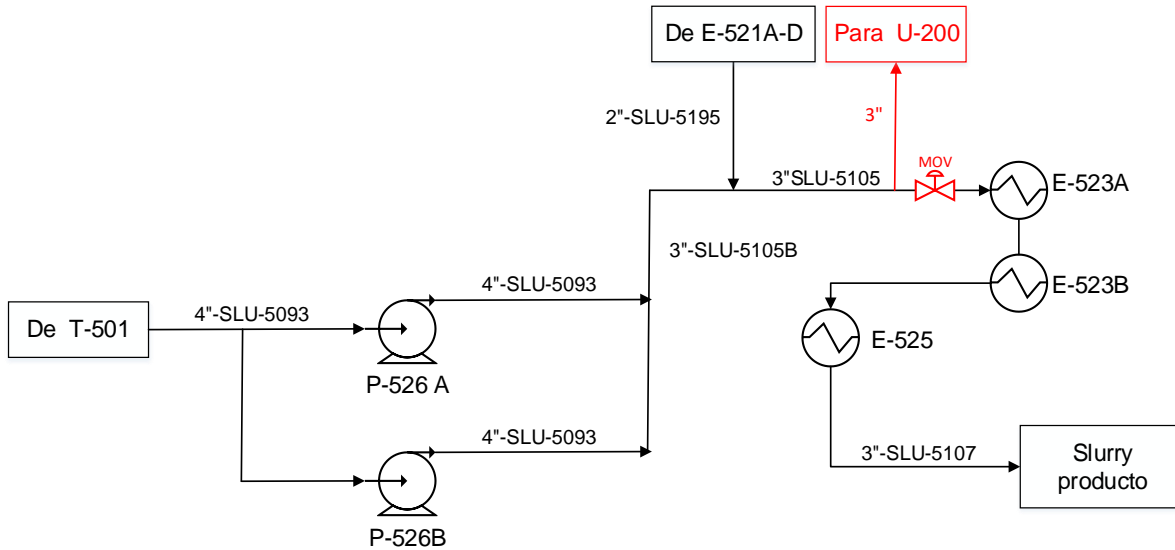


Figura 13. Circuito de fondo T501

Con respecto a las facilidades de tubería requeridas, se debe instalar una línea de 3" para enviar el Slurry desde la descarga de la bomba P-526 hacia la unidad 200. Adicionalmente, se implementarán las adecuaciones para instalar la válvula y la platina de orificio asociadas al nuevo sistema de control, de igual forma, se hace necesario una reducción en la tubería para lograr el cargue por medio de una boquilla de 2" a la torre T-205. En la Figura 12 se puede observar el montaje en paralelo de las dos alternativas de cargue involucradas en la iniciativa.

De igual forma, se requiere la implementación de un calentamiento eléctrico en la totalidad de las líneas de Slurry desde la unidad 500 hasta la torre 205, para evitar que la temperatura presente valores inferiores a 640°F y se generen taponamientos en el recorrido. En el mismo sentido, se verificó la existencia de facilidades para la inyección de ALC y gasóleo con el fin de limpiar las líneas y evitar acumulación de Slurry que generen taponamientos durante el mantenimiento de las unidades involucradas.

## 6. Conclusiones

-Con este proyecto se logró validar el modelo de la destilación al vacío en la torre 205 de la refinería de Barrancabermeja, bajo las condiciones actuales del proceso y las condiciones de diseño de los equipos involucrados. El modelo obtenido presenta resultados con errores inferiores al 7% en flujos y temperaturas de las corrientes de salida, representando una herramienta para el análisis de nuevas iniciativas y diagnósticos de problemas en la operación.

-Se ratificó que el procesamiento de Slurry en la torre 205 corresponde a una iniciativa factible en términos operativos y económicos, permitiendo la reducción en 2,5 KBPD de la producción de Fuel Oil. Sin embargo, las condiciones de operación deben asegurar una temperatura de fondo mínima de 604°F y mantener la temperatura de cima en 129°F. De igual forma, se debe garantizar un flujo de 6340 lb/h en el vapor de despojo; obteniendo un rendimiento del Slurry de 50% hacia gasóleo pesado y 50% hacia fondo de vacío. Por otro lado, se necesita un aumento de  $1,08 \times 10^7$  btu/h en el retiro lateral de calor, para regular la temperatura en la torre y realizar un lavado efectivo que logre condensar los compuestos pesados en la corriente de GPV.

-Se resalta que se verificó que los equipos E-233, E-214, T-205 y las bombas P-526 y P-223 no representan limitantes para la iniciativa, ya que todos se encuentran dentro de sus condiciones de diseño.

- Se comprobó que no existen limitaciones hidráulicas y que se cumple con los rangos de velocidad recomendados para el envío de 2,5 KBPD de slurry hacia la T-205. Sin embargo, se debe asegurar el montaje de los 2 sistemas de carga presentados en el documento, para asegurar

flexibilidad en la operación de la T-205 debido a posibles taponamientos. De igual forma, para el cargue exitoso en la unidad 200 se debe adquirir una nueva válvula de control de 2 in con un Cv de 25 que contemple cavitación incipiente en su diseño para evitar daños en la operación.

## 7. Recomendaciones

Se enmarca la necesidad de la implementación de un hidrociclón en la unidad 500 para lograr la separación de los sólidos suspendidos presentes en el Slurry. En caso de no ser instalado el equipo antes de comenzar con el procesamiento de Slurry en la torre 205, la alternativa de cargue por medio de la línea de transeferencia quedaria inhabilitada debido a un alto riesgo por las altas velocidades (254,88 m/s), que sumado con la presencia de sólidos incrementan la velocidad de erosión en las líneas.

Con el fin de evitar el direccionamiento de Slurry a la preparación de combustóleo durante episodios donde la torre 205 no pueda recibirlo, se requiere la construcción de facilidades a otra torre de vacío para su procesamiento en ese escenario. Debido a lo anterior, se propone el cargue a la torre 2103 debido a su proximidad con la unidad de Orthoflow, sin embargo, se recomienda realizar una revisión para el procesamiento de Slurry en esta torre por medio de la simulación de la operación con diferentes modelos termodinámicos que permitan la elección del paquete con mejor ajuste en la operación.

Se recomienda priorizar los resultados de la analítica SARA de los productos obtenidos con el fin de cuantificar y verificar el aumento en el contenido de aromáticos del gasóleo y de los fondos producidos en la torre. En este mismo sentido, se sugiere realizar pruebas a nivel industrial en las unidades de craqueo catalítico fluidizado con el fin de esclarecer la craqueabilidad y límites de cargue del gasóleo generado a partir procesamiento de Slurry.

### Referencias Bibliográficas

Coker, A. K. (2018). *Petroleum Refining Design and Applications Handbook* (Wiley, Ed.). ScrivenerPublishing.

Descripción general del proceso U200. (2007). In *Manual de descripción de procesos en la unidad de refinación de crudos 200* (p. 26).

Ecopetrol. (n.d.-a). Descripción general del proceso U500. In *Manual de descripción de procesos en la unidad de cracking catalítico Orthoflow U500, Refinería de Barrancabermeja*.

Ecopetrol. (n.d.-b). *Hoja de especificación de la torre 205*. Barrancabermeja.

Ecopetrol. (2010). Descripción general del proceso DAP. In *Manual de descripción de procesos en la unidad de desasfaltado con propano*.

Ecopetrol. (2014). Nuestra Historia.

Ecopetrol. (2019). *Análisis de factibilidad para administración de cambios en activos industriales*. Barrancabermeja.

*El límite mundial de contenido de azufre de 2020*. (n.d.).

Fahim, M., Al-Sahhaf, T., & Elkilani, A. (2010). *Fundamentals of Petroleum Refining* (1st ed.; ELSEVIER, Ed.). Khaldeya, Kuwait.

International Maritime Organization. Marine Environment Protection Committee. (n.d.). *IMO 2020 : consistent implementation of MARPOL Annex VI*.

*Línea de productos industriales-Ecopetrol*. (2019). Barrancabermeja.

López, F. (2015). *Evaluación de las consecuencias de la nueva regulación de la OMI sobre combustibles marinos*. Escuela técnica superior de ingenieros navales.

*Procesos de destilación atmosférica de crudos y al vacío*. (2007). Buenos Aires.

Puello Méndez, J., Afanasjeva, N., & Cifuentes, M. Á. (2013). Correlaciones estadísticas para la estimación de propiedades reológicas de asfaltos en estado original y envejecido. *Revista ION*.

Pujro, R., Falco, M., & Sedran, U. (2015). Catalytic cracking of heavy aromatics and polycyclic aromatic hydrocarbons over fluidized catalytic cracking catalysts. *Energy and Fuels*, 29(3), 1543–1549. <https://doi.org/10.1021/ef502707w>

Ruiz, L., Vega, J. ., Martínez, J., & Erdmann, E. (2013). Diseño del proceso de destilación al vacío. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*, 7.

Sadeghbeigi, R. (n.d.). *Fluid Catalytic Cracking Handbook: Design, operation and troubleshooting of FCC facilities* (2nd ed.; Elsevier, Ed.). Gulf professional publisher.

Suárez, J. A. (2018). *Evaluación de la extracción por solventes como alternativa para valorizar el Slurry* (Vol. 2).

Vargas, X., & Reyes, F. (2010). *El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos* (Vol. 30). En español.

## Apéndices

### Apéndice A. Alternativas de cargue para el procesamiento de Slurry en T-205

La iniciativa plantea orientar el Slurry procedente de la unidad Orthoflow hacia la torre de destilación al vacío T-205 para su procesamiento. El Slurry se destinará a una temperatura de 640°C, un valor incluso superior a la condición de entrada del crudo reducido en la T-205. El sistema propuesto debe garantizar las siguientes premisas:

- Disminuir el flujo de Slurry destinado a la preparación de combustóleo.
- Garantizar la integridad de todos los equipos involucrados.
- Asegurar la mínima inversión para su implementación.
- Aumentar la producción de gasóleos y fondos de vacío

En función de las premisas señaladas, se debe establecer el lugar óptimo para el cargue del Slurry. A continuación, se presentan las alternativas consideradas.

#### **Alternativa 1: cargar el Slurry antes del sistema de control LV208A**

Con el fin de ingresar el Slurry a la torre por medio de la línea de transferencia, se propone cargarlo antes del sistema de control LV208A como se indica en la Figura 11.

Esta alternativa permitiría un alto rendimiento de gasóleos debido a que el Slurry entraría junto con el crudo reducido a la zona flash donde su vaporización sería la máxima posible. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el Slurry al contener partículas suspendidas genera un riesgo debido a la erosión que se puede llegar a provocar en las líneas involucradas, riesgo que se ve

incrementado con esta alternativa debido a las altas velocidades (200 ft/s) en la línea de transferencia. Debido a lo anterior, una separación eficiente que asegure el menor ingreso de partículas suspendidas a la línea de transferencia corresponde a un parámetro clave en esta alternativa.

### **Alternativa 2: cargar el Slurry por la boquilla 4N**

Debido a que el sistema de aceite de reciclo de la torre T-205, que se aprecia en la Figura 1, no es utilizado hace 3 años a causa de un taponamiento en las tuberías; se propone dismantlar este circuito y utilizar la boquilla 4N que actualmente se encuentra fuera de servicio para realizar el cargue de Slurry de forma independiente por este medio.

En la Figura 14 se resalta en amarillo la ubicación de la boquilla a utilizar, como se puede observar se encuentra ubicada en la parte inferior de la zona flash, debido a lo anterior, el rendimiento de gasóleo que se obtiene con esta alternativa llegaría a ser menor en comparación con las otras opciones planteadas, sin embargo, no se proyecta una disminución drástica debido a que la inyección de vapor que se realiza en la torre se encuentra ubicada de forma estratégica a esta boquilla.

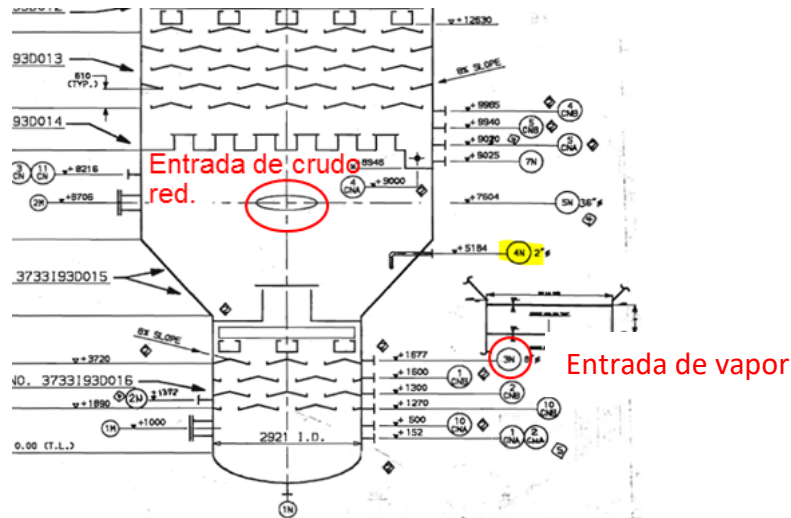


Figura 14. Boquilla 4N en plano mecánico de T-205

### Alternativa 3: cargar el Slurry al sistema de reciclo caliente de GPV

Se propone cargar el Slurry al sistema de reciclo caliente de GPV debido a que de esta manera podría atravesar la zona flash sin necesidad de ingresar por medio de la línea de transferencia y sin requerir la construcción de una nueva boquilla en la torre. Por otro lado, se debe tener en cuenta que en esta alternativa el Slurry tendrá que atravesar un lecho con empaque ordenado, por lo cual el ensuciamiento representa un parámetro clave y de especial cuidado en esta alternativa.

Se resalta que el correcto lavado en el proceso de destilación al vacío constituye una variable de influencia directa con la calidad de los gasóleos obtenidos, y al realizar el lavado con Slurry, se podría generar arrastre de contaminantes presentes en este compuesto.

Realizando un balance de las ventajas y desventajas mencionadas, se descarta la alternativa 3 debido a que, aunque se considera de fácil implementación, compromete tanto la calidad de los gasóleos obtenidos como la integridad del empaque estructurado. Por otro lado, se debe tener en cuenta que la alternativa 1 representa el escenario más favorecedor con respecto a rendimiento de gasóleo en la torre, sin embargo, presenta un riesgo de erosión con el posible ingreso de sólidos

suspendidos a la línea de transferencia que maneja altas velocidades; mientras que la alternativa 2, aunque presenta un menor rendimiento de gasóleo y supone realizar el cargue directo a la torre, no supone un alto riesgo al realizar el cargue de forma independiente.

Por lo anterior, se decide realizar la evaluación hidráulica de la alternativa 1 y 2, la cual se profundiza en el apéndice D, para de esta manera comprobar la viabilidad de las alternativas propuestas, que no existen limitaciones en los sistemas y posteriormente, concluir que la alternativa de cargue más acertada es ingresar el Slurry por medio de la boquilla 4N. Sin embargo, debido a la incertidumbre de la integridad de la boquilla se recomienda realizar el montaje en paralelo de las facilidades requeridas para realizar el cargue, de ser necesario, como se encuentra descrito en la alternativa 1.

## Apéndice B. Caracterización analítica del Slurry

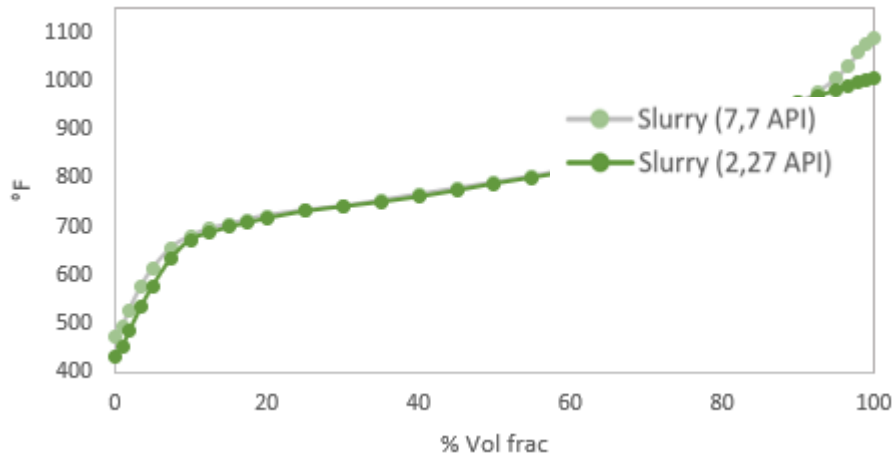


Figura 15. Curvas de destilación D1160 para el Slurry de Orthoflow

Tabla 4.

*Caracterización del Slurry de Orthoflow*

<b>Fecha</b>	<b>7/04/2016</b>	<b>9/05/2019</b>
<b>PROPIEDAD</b>	<b>VALOR</b>	<b>VALOR</b>
Gravedad a 15°C [g/ml]	1,0156	1,0567
Gravedad API [°API]	7,7	2,27
Carbón Conradson [%peso]	4,63	4,29
Azufre Horiba [ppm]	18578	15800
Viscosidad a 50°C [cSt]	152,5693	78,76
Viscosidad a 100°C [cSt]	11,2147	8,32
Punto de Inflamación [°C]	123	118
Contenido de cenizas [%peso]	0,0048	0,043
Níquel [ppm]	1,005	0,911
Vanadio [ppm]	1,338	1,798

<b>Fecha</b>	<b>7/04/2016</b>	<b>9/05/2019</b>
<b>PROPIEDAD</b>	<b>VALOR</b>	<b>VALOR</b>
Silicio [ppm]	29	53,34
Hierro [ppm]	4,29	9,621
Aluminio [ppm]	46	41,85

Tabla 5.

*Análisis SARA para el Slurry de Orthoflow*

<b>Análisis SARA (%peso)</b>	
Saturados	27,82
Aromaticos	68,13
Resinas+Asfaltenos	3,91
Asfaltenos	0,14

### Apéndice C. Análisis hidráulico

El objetivo del análisis hidráulico es verificar que no existan limitaciones hidráulicas y comprobar que las líneas involucradas en la iniciativa propuesta cumplan criterios de diseño y capacidad; de igual manera definir los requerimientos de ingeniería para los controles requeridos y establecer el óptimo esquema de operación.

En términos generales se aplicaron los criterios de diseño establecidos en el numeral 7.2 correspondiente a criterios para el dimensionamiento de líneas de proceso del manual técnico de criterios de diseño de la especialidad de ingeniería de proceso de Ecopetrol. Se destaca que fundamentalmente el diámetro será el criterio evaluado en función de la velocidad máxima permisible (15 ft/s para fase líquida y 100 ft/s para fase vapor).

**-Software utilizado:** Se utilizó el software INPLANT 4.5 para realizar los cálculos hidráulicos simulando la red de los circuitos a evaluar. De igual manera, se utilizó el programa instru calc 5 para el dimensionamiento de los elementos de control requeridos en los sistemas planteados.

En este apéndice se presentan los cálculos realizados para determinar las condiciones de flujo, pérdidas de presión y velocidad de las dos alternativas consideradas para enviar el Slurry desde la unidad 500 hacia la unidad 200. A continuación, se enumeran los dos circuitos de cargue a evaluar:

1. El cargue por medio de la línea de transferencia antes del sistema de control LV208A
2. El cargue por medio de la boquilla 4N.

**-Análisis de resultados:** Debido a que no se cuentan con medidores de presión en el fondo de la torre T-204, se resalta que la presión supuesta (20 psig) para el crudo reducido procedente de dicha torre, corresponde a un estimado obtenido a partir de la presión registrada en la zona flash. De igual forma, se debe tener en cuenta que otra premisa utilizada en la simulación corresponde a que el Slurry procedente de la U500 posee una presión de 80 psig al salir de la bomba P-526, valor histórico obtenido en medidor ubicado en campo.

### **Alternativa 1: cargue de Slurry al sistema de control LV208A**

En la Figura 16 se representa el caso base de estudio que corresponde al circuito utilizado actualmente para alimentar el crudo reducido desde la torre T-204 hacia la torre T-205. De acuerdo con los resultados obtenidos se puede observar que la válvula LV208A ubicada en el tramo L013 reduce la presión del crudo reducido hasta 8,428 psia, posteriormente, en la línea de transferencia existe una caída de presión de 7 psi por acción del vacío de la torre T-205. Para validar la simulación se comprobó que el porcentaje de apertura de la válvula coincida con el valor reportado para la misma (45%) y que al mismo tiempo las presiones y los flujos sin especificar arrojen los valores esperados. Sin embargo, se encontró que para satisfacer las condiciones de proceso el porcentaje de apertura que se obtiene en la simulación corresponde a un valor de 57%, diferencia aceptable debido a que no se cuentan con las propiedades reales del fluido ni con la presión exacta del crudo. Por otro lado, se resalta que la velocidad en el tramo L022 (línea de transferencia) no corresponde con la realidad debido a que la simulación desarrollada presenta restricciones, ya que no tiene en cuenta que en este tramo se registra un flujo bifásico que presenta altas velocidades.

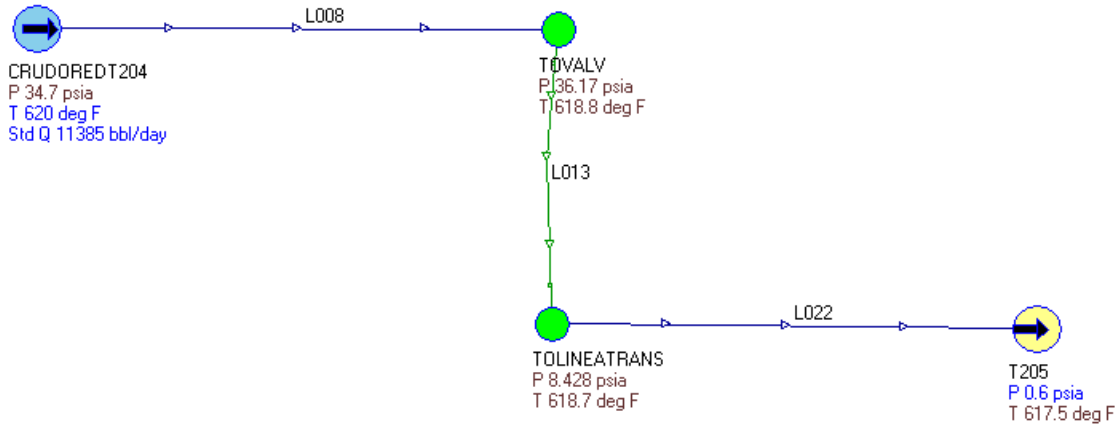


Figura 16. Circuito de carga del crudo reducido a T-205 (caso base)

Por lo anterior, se hace uso del software Aspen Hysys 10.0 para calcular la velocidad que se podría llegar a obtener en este tramo del circuito, en función de lo mencionado se encontró que la velocidad máxima registrada en esta línea corresponde a un valor de 130,883 ft/s, dato obtenido según el punto de vaporización máxima en la línea, que corresponde a unas condiciones de temperatura y presión de 620 °F y 0,5957 psia respectivamente. Debido a que actualmente no se supera la capacidad de diseño de la torre, se presume que la velocidad registrada no representa ningún riesgo, de igual manera, se calcula la velocidad de erosión con la ecuación 1, donde C toma un valor de 100 al ser un sistema continuo libre de partículas sólidas, y se verifica que la velocidad del fluido no supera el límite de erosión (421,23 ft/s).

$$V_e = \frac{C}{\sqrt{\rho_m}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Una vez finalizado el modelamiento del circuito de carga del caso base, se procede a analizar la viabilidad de la alternativa de carga del Slurry al sistema LV208A. se realizó la simulación del circuito mostrado en la figura 20, este representa la ruta hipotética de carga del slurry desde la salida de la bomba P-526 en la U500 hasta el sistema de control LV208A en la U200 (tramo L003). Se resalta que esta simulación se basa en medidas aproximadas obtenidas a partir de inspecciones

visuales donde se realizó un seguimiento de rutas probables de cargue a través de los bancos de tuberías cercanos a los equipos y las dos plantas involucradas.

En primera instancia se ingreso el Slurry como flujo directo a la torre T-205, sin embargo, como se observa en la Figura 17, no se alcanzaba la presión registrada a la salida de la bomba P526 (80 psig), por lo cual se intento aumentando la apertura de la válvula LV208A, sin embargo, se descubrio que la apertura máxima de este elemento corresponde a un incremento del 5% con respecto al caso base, lo anterior, debido a que valores superiores a esta apertura ocasionarian una disminución desproporcionada en la presión del crudo reducido de la torre T204 que pueden llegar a ocasionar problemas de operación en dicha torre.

LINK NAME	FROM NODE	TO NODE	FLOW RATE (BPD)	PRESSURE IN (PSIA)	PRESSURE OUT (PSIA)	IMBALANCE (PSIA)
L003	SLUR	TOVA	2500.000	40.71	33.75	
L008	CRUD	TOVA	11385.000	32.30	33.75	0.000
L013	TOVA	TOLI	13885.000	33.75	8.32	
L022	TOLI	T205	13885.000	8.32	0.60	0.000
MAX PRESSURE IMBALANCE =					0.0000000 (PSIA)	AT NODE T205
RMS AVERAGE PRESSURE IMBALANCE =					0.0000000 (PSIA)	

Figura 17. Resultados Inplant- Flujo de slurry fijo en 2,5 KBPD

Por la situación mencionada, se decidio fijar la presión del Slurry en 80 psi para evaluar el comportamiento del circuito en caso de ingresar el Slurry en flujo libre, los resultados se presentan en la figura 18, donde se observa un aumento desmedido del flujo de Slurry proveniente de Orthoflow.

LINK NAME	FROM NODE	TO NODE	FLOW RATE (BPD)	PRESSURE IN (PSIA)	PRESSURE OUT (PSIA)	IMBALANCE (PSIA)
L003	SLUR	TOVA	8778.220	80.00	32.32	
L008	CRUD	TOVA	11385.000	30.88	32.32	0.000
L013	TOVA	TOLI	20163.220	32.32	8.33	
L022	TOLI	T205	20163.220	8.33	0.60	-0.001
MAX PRESSURE IMBALANCE =					-0.0006092 (PSIA)	AT NODE T205
RMS AVERAGE PRESSURE IMBALANCE =					0.0005533 (PSIA)	

Figura 18. Resultados Inplant-presión de Slurry fija en 80 psi

En este escenario, se concluye que para realizar el cargue al LV208A de forma exitosa se hace necesario la instalación de un sistema de control en la línea de Slurry que regule el flujo de esta corriente proveniente de la U500. En función de encontrar las características de la válvula de control y de la platina de orificio, se realizó el dimensionamiento de los elementos requeridos y se utilizó el programa instru calc 5 junto con las propiedades fisico-químicas de las sustancias para confirmar los resultados. Los parámetros de dimensionamiento de estos elementos son presentados en las figuras 18 y 19.

Se resalta que para la nueva válvula de control se requiere de un sistema de cierre en falla, debido a que de esta forma se estaría protegiendo la operación en la torre T501 ubicada aguas arriba de este elemento, y de igual forma en la torre 205. En la figura 19 se observan los parámetros obtenidos del dimensionamiento de esta nueva válvula, según condiciones se debe especificar de 1,5 in con un Cv de 24,75. El estado se reporta como “normal” y no se observan restricciones hidráulicas que puedan llegar a afectar la integridad de este nuevo elemento ya que no se presentan síntomas de cavitación. De igual forma, en la figura 20 se observa que la nueva platina debe tener un diámetro de orificio de 1,65767 in para el manejo de un flujo máximo de 3000 BPD.

Input data		Flow Data			Fluid	
Tag		Case 1	Normal	Case 2	Slurry	
Liquid flow	bbl/d	3000	2500	500	Valve rated data	
Percent of system flow		100	50	10	Body	Trim
Flow temperature	degF	640	640	640	Globe	Linear Conto
Inlet pressure	psig	80	80	80	Flow To	Ports
Valve pressure drop	psi	33.36	39.29	42.25	Open	One
SG @ flow conditions		.823	.823	.823	Size	in Cv
Viscosity @ FTP	cp	.316	.316	.316	1.5	24.75
Vapor pressure	psia	26	26	26	F L	Fd Kc
Critical pressure	psia	361.3	361.3	361.3	.9	1 .65
FL @ % flow		.9	.93	.97	Pipe sizes	
Calculated Cv		14.51	11.142	2.1489	Inlet	Outlet Wall
					3	3
<b>Output data</b>					<b>Calculation options</b>	
Percent of valve Cv		59	45	9	<input checked="" type="radio"/> Valve size	
Cavitation index		2.0603	1.7493	1.6267	<input type="radio"/> Flowrate	
Noise level	dba	0	0	0	<input type="radio"/> Pressure drop	
Sizing pressure drop	psi	33.36	39.29	42.25	By	Date
Flow status		Normal	Normal	Normal		8746

Figura 19. Dimensionamiento de válvula requerida en alternativa 1

Input data		Output data	
Tag	SLU_T205	Beta ratio @ flow temp	.553438
Fluid		Norm flow differ	inH2O 69.44
Max flow @ 60F	bbl/d 3000	Norm. flow Reynolds No.	251762
Norm flow @ 60F	bbl/d 2500	Max pressure loss	inH2O 68.08
Flow temperature	degF 640	Max power loss	hp .1589
Inlet pressure	psig 80	Uncertainty percent	.5871
Max flow differential	inH2O 100	Min plate thickness	in .125
SG @ flow conditions	.823	<b>Calculation factors @ normal flow</b>	
SG @ base conditions	1.04	Plate thermal expansion	1.00543
Viscosity @ FTP	cp .316	Velocity of approach	1.05049
Meter tube ID @ 68F	in 3	Discharge coefficient	.606694
Vent/drain hole dia	in	<b>Calculation options</b>	
Orifice dia @ 68degF	in 1.65767	<input type="checkbox"/> Vent hole	<input checked="" type="radio"/> Orifice size
Element material	304 stainless steel	<input type="checkbox"/> Drain hole	<input type="radio"/> Flowrate
Meter tube material	Carbon steel	<input checked="" type="radio"/> Standard size	<input type="radio"/> Differential range
		<input type="radio"/> Custom size	
Calculate			

Figura 20. Dimensionamiento de platina de orificio

En virtud de comprobar la hipótesis anterior, de requerir un nuevo sistema de control para realizar el cargue exitoso en la torre, se decidió añadir al circuito de cargue una válvula que dentro de sus características cumpliera con los parámetros presentados anteriormente, en la figura 21 se

observa el circuito representado junto con los resultados obtenidos que apoyan y comprueban la hipótesis planteada inicialmente.

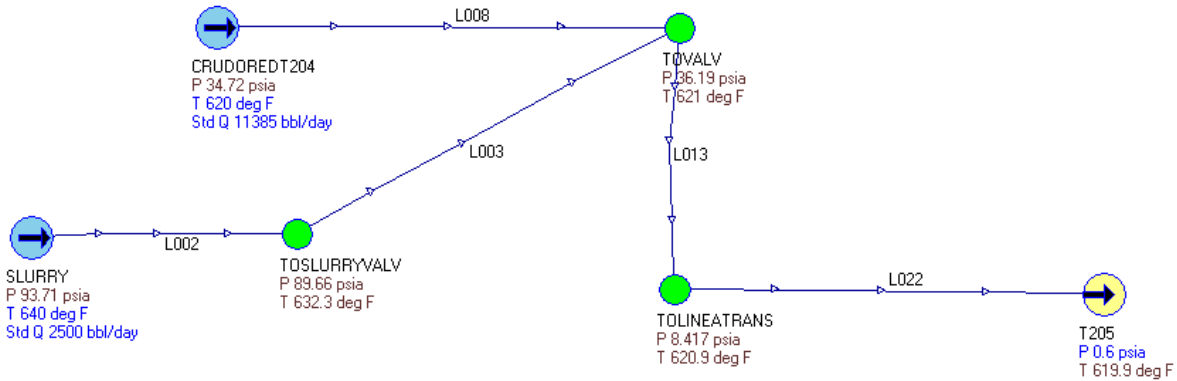


Figura 21. Circuito de carga de Slurry a LV208A

A continuación, se muestra el resumen de los resultados donde se relacionan parámetros como la caída de presión, caudal, y velocidad de flujo en el circuito representado:

Tabla 6.

Parámetros hidráulicos del cargue de Slurry al LV208A

Parámetro	Unidades	L008	L002
Caudal std	bpd	11385	2500
Longitud	ft	91.86	377.30
D nominal	In	10	3
$\Delta P/100$	psi/100ft	1.58	1.3
$\Delta P$ Total	psi	1.47	4.05
Velocidad	Ft/s	1.81	4.27
<b><i><math>\Delta P</math> LV208A</i></b>	psi	27.51	
<b><i><math>\Delta P</math> SLU FV</i></b>	psi	52.89	

De acuerdo con los resultados obtenidos no se encuentra restricción hidráulica en el esquema propuesto para el envío de 2.5 KBPD de Slurry desde la P526 hasta la T205, sin embargo, para el correcto desarrollo de esta alternativa de cargue se hace necesario la implementación de un nuevo sistema de control que cumpla con los parámetros señalados en el presente documento, la válvula asociada a este sistema presentará una apertura entre 40 y 50%.

Por otro lado, para realizar el cargue de Slurry de la manera descrita la velocidad del fluido constituye un parámetro clave debido a que el Slurry contiene sólidos suspendidos que al presentar altas velocidades incrementan el riesgo de erosión en las líneas. Debido a lo anterior, calcular la velocidad de erosión en este sistema y comprobar que el valor reportado se encuentre dentro del límite enmarcado es de vital importancia. Sin embargo, para calcular esta velocidad en flujos bifásicos con sólidos suspendidos se requiere de una simulación computacional robusta junto con una distribución de partículas con la cual no se cuenta. En este escenario, se decide realizar el análisis con la velocidad de erosión calculada para el caso base (sin contemplar sólidos suspendidos), por lo que se comparó la velocidad del sistema en este circuito (254,88 ft/s) y se encontró que no supera la velocidad de erosión calculada anteriormente (421,23 ft/s), por lo cual, se podría predecir, sin total certeza, que la alternativa no supone un riesgo para su operación.

#### -Alternativa 2: cargue de Slurry por medio de la boquilla 4N

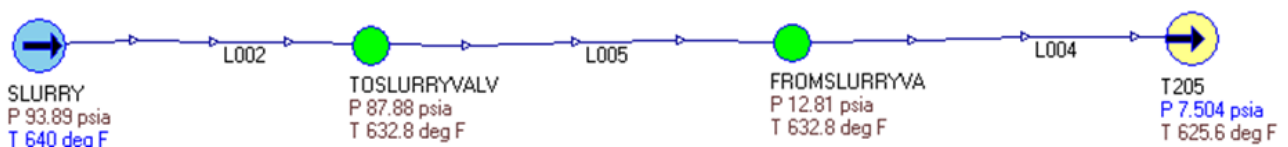


Figura 22. Circuito de cargue de Slurry por medio de a boquilla 4N

En la figura 22 se muestra el circuito de Slurry desde la P526 succionando de la T-501 hasta la T-205 para la alternativa de cargue independiente de 2.5 KBPD de Slurry por medio de una boquilla de 2 in ya existente en el equipo. Según los resultados obtenidos no se observa restricción hidráulica para enviar Slurry desde la unidad 500 hacia la unidad 200 en el sistema propuesto, se resalta que se realizó un ejercicio equivalente al presentado para el análisis de la primera alternativa, se ingresó inicialmente en flujo libre y se observó que no es posible debido a que existe un diferencial de presión elevado que no permite un control del flujo de Slurry proveniente de la torre 501. Debido a lo anterior, se procedió a dimensionar una válvula de control que se ajustara las condiciones del sistema, los resultados obtenidos de este proceso se muestran en la figura 23.

Input data		Flow Data			Fluid	
		Case 1	Normal	Case 2		
Tag	SLU_4N				Slurry	
Liquid flow	bbl/d	3000	2500	500	Valve rated data	
Percent of system flow		100	50	10	Body	Trim
Flow temperature	degF	640	640	640	Globe	Lin Cavitation
Inlet pressure	psig	80	80	80	Flow To	Ports
Valve pressure drop	psi	73.9	75.42	79.69	Close	One
SG @ flow conditions		.823	.823	.823	Size	in Cv
Viscosity @ FTP	cp	.316	.316	.316	2	25
Vapor pressure	psia	26	26	26	F L	Fd Kc
Critical pressure	psia	361.3	361.3	361.3	.95	1 .73
FL @ % flow		.95	.96	.97	Pipe sizes	
Calculated Cv		10.052	8.2922	1.642	Inlet	Outlet Wall
					3	3
Output data					Calculation options	
Percent of valve Cv		40	33	7	<input checked="" type="radio"/> Valve size	
Cavitation index		.93004	.9113	.86247	<input type="radio"/> Flowgate	
Noise level	dbA	0	0	0	<input type="radio"/> Pressure drop	
Sizing pressure drop	psi	63.634	64.93	66.238	By	
Flow status		Flashing	Flashing	Flashing	Date	
					25141	

Figura 23. Dimensionamiento de válvula requerida para la alternativa 2

De acuerdo con los datos arrojados por el software instru calc 5 se observa que la válvula requerida es de 2" con un Cv de 25, adicionalmente, se necesita un diseño que contemple

cavitación incipiente para evitar daños en el elemento. Para comprobar el correcto funcionamiento del sistema propuesto se utilizó una válvula que cumpliera con los parámetros establecidos y utilizando la curva característica que proporciona el fabricante se evaluó el ajuste en el circuito, de esta manera se pudo comprobar las velocidades de las líneas y el correcto funcionamiento hidráulico del sistema propuesto con una apertura en la válvula entre el 30%-40%.

Se destaca que esta alternativa requiere de una mayor caída de presión al realizar de forma directa el cargue a la torre, por lo cual, para la implementación de la misma se debe contemplar cavitación incipiente en el diseño e instalación de la válvula para evitar fallas en la operación.

De igual forma, se encontró que la válvula se debe ubicar lo más cercano posible a la torre para evitar caídas de presión excesivas que generen una vaporización no deseada en la línea, se resalta que con una tubería de 2 in a la salida de la válvula, la presión mínima soportada para mantener los valores de velocidad de ambas fases dentro de los valores permitidos es de 9 psi; sin embargo, se recomienda instalar una facilidad de 3 in que soportaría una presión de hasta 7.5 psi y seguiría cumpliendo con los parámetros de diseño garantizando al mismo tiempo la suficiencia de la línea.

Tabla 7.

*Parámetros hidráulicos para el cargue de Slurry por medio de la boquilla 4N (línea de 3")*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>L002</b>	<b>L004</b>
Caudal std	Bpd	2500	2500
Longitud	Ft	369.09	9.84
Diam nominal	In	3	3
$\Delta P$ Total	Psi	5.94	5.31
Velocidad (Liq)	Ft/s	4	3.96
Velocidad	Ft/s	-	66.20

Parámetro	Unidades	L002	L004
(Vap)			
$\Delta P_{FVslurry}$	Psi	75.07	

### Recomendaciones

-En la primera alternativa al ingresar el Slurry al sistema de control LV208A el cargue no se realiza directamente a la torre, de esta manera, la caída de presión requerida es menor, sin embargo, debido a los riesgos asociados a esta alternativa, y al correcto funcionamiento de la segunda, se decide realizar el cargue de Slurry de forma independiente según lo establecido en la alternativa 2. No obstante, se resalta que debido a la incertidumbre del correcto funcionamiento de la boquilla 4N se recomienda dejar instaladas las facilidades para realizar, en caso de ser requerido, el cargue del Slurry de la forma descrita en la primera alternativa.

-Con el fin de generar los gastos mínimos posibles se determinó que era posible utilizar una sola válvula para ambas alternativas, de esta manera, la nueva válvula de control (FV290) se debe especificar de 2 in con un Cv de 25 que contemple cavitación incipiente en su diseño para evitar daños durante operación. La ubicación de la válvula deberá realizarse de forma estratégica aspirando a tener la ubicación más próxima a la torre para evitar una caída de presión excesiva que genere una vaporización no deseada en la línea.

#### **Apéndice D. Limitaciones operacionales en la unidad 500 (Orthoflow) por el procesamiento de Slurry en la T-205**

Durante el análisis de riesgo se definió la necesidad de un alineamiento de Slurry a una torre diferente a la 205, ya que en caso de que este equipo no pueda recibir el Slurry y no exista disponibilidad de enviarse a otra unidad, se podría generar una inundación en la fraccionadora principal de Orthoflow. En este sentido, se recomienda realizar facilidades para enviar el Slurry en caso de ser necesario a la torre 2103 y de igual forma realizar un análisis operativo del procesamiento de este compuesto en la torre.

En caso de no ser posible el direccionamiento a ninguna de las dos torres involucradas, la directriz debe ser el alineamiento hacia el sistema de enfriamiento (E523A/B y E525). Se resalta que estos equipos quedarían por fuera del circuito principal en el marco del procesamiento de Slurry en las torres de vacío. Por lo anterior, para asegurar la integridad de los intercambiadores se debe comprobar que el fluido frío se encuentre circulando antes de ingresar el Slurry.

Para lo anterior, en el caso del E-525 no se presenta ninguna restricción debido a que el flujo de agua de enfriamiento en este equipo se puede asegurar de forma permanente sin ninguna eventualidad. Por otro lado, para los E-523AB se requieren analizar diferentes alternativas que permitan la correcta implementación de estos equipos en caso de ser requeridos, ya que utilizan agua de caldera (245 °F) como fluido de enfriamiento, por lo cual se requiere una revisión de los riesgos asociados al flujo permanente de este fluido debido a las altas temperaturas, y de igual

forma, realizar una revisión de otras alternativas de implementación. A continuación, se presentan las alternativas y los parámetros considerados:

1. Direccionar Slurry por una facilidad de desocupación desde el E-521 que no es utilizada actualmente, se direccionaría un mínimo flujo de Slurry con el fin de mantener el E-523AB en servicio. Se debe tener en cuenta que se cumpla con la velocidad mínima por el lado tubos del equipo y se debe verificar que el flujo de Slurry direccionado por esta tubería corresponda al valor mínimo debido a que el destino final de este circuito es la preparación de combustóleo, por lo cual, de ser un flujo similar al volumen procesado en las torres de destilación la iniciativa no sería factible.

**ESTADO: DESCARTADA**

Se descarta esta alternativa porque durante la simulación del equipo se encontró que el flujo mínimo para garantizar la velocidad recomendada en el intercambiador (3-4 ft/s) por el lado tubo es 1700 BPD de Slurry, por lo cual no tendría sentido procesar 2,5 KBPD en la torre de vacío y seguir direccionando 1,7 KBPD a la preparación de combustóleo.

Se pensó en direccionar los 1,7 KBPD de Slurry frío al sistema de recirculación en la T501, sin embargo, este flujo es muy alto para recircularse teniendo en cuenta que actualmente solo se recirculan 900 BPD a este equipo.

2. Mantener el E-523AB en servicio direccionando una parte del flujo (mínimo) a través de los intercambiadores y el flujo restante permanecería en bypass (facilidad existente) hacia la salida de estos equipos, en este sentido, el direccionamiento hacia las unidades de refinación de crudos se realizaría después de los E-523AB. En este escenario, se debe garantizar la velocidad mínima de los fluidos en el equipo. De igual forma, se debe

verificar que la temperatura del Slurry direccionado a la unidad 200 no sea inferior a 590 °F para garantizar la correcta operación en la torre de vacío.

**ESTADO: DESCARTADA**

Durante la simulación se encontró que el flujo mínimo para garantizar la velocidad recomendada en el intercambiador (3-4 ft/s) por el lado tubo es 1700 BPD de Slurry, por lo cual los 800 BPD restantes saldrían por el bypass a una temperatura de 640 °F y se unirían con el flujo de Slurry a la salida del E-523AB para ser direccionado a la torre de vacío. Sin embargo, no es una alternativa viable debido a que la temperatura del Slurry a procesar disminuiría hasta 443.8 °F.

3. Circular agua de caldera de forma permanente en el E-523A/B debido a que corresponde al fluido frío por lo cual se cumple con el procedimiento operacional y su temperatura (245 °F) NO supera los límites establecidos por diseño en el lado casco (343 °F), de esta manera, durante una emergencia, con una válvula MOV se permitirá el paso de Slurry al circuito de enfriamiento.

**ESTADO: EN REVISIÓN**

Se consultó la viabilidad de la alternativa con algunos operadores y tableristas de la unidad, los trabajadores Leonardo Londoño, Jorge Durán y Hector Galvis manifiestan que desde su punto de vista la alternativa no representa un alto riesgo debido a que el equipo está diseñado para soportar altas temperaturas por el lado casco, y de igual forma manifiestan que la alineación normal de estos equipos es circular en primer lugar el fluido frío (agua de caldera) y seguidamente, de forma gradual, alinear el Slurry. Por lo anterior, se recomienda que la válvula MOV no tenga un funcionamiento on/off en caso de emergencia, por el contrario, que en caso de ser requerido se realice una maniobra gradual, pero en el

menor tiempo posible para evitar problemas de sobrepresionamiento o alto nivel aguas arriba del instrumento.

De igual forma se resalta que el sistema de enfriamiento de Slurry producto solo estaría funcional en el caso de una emergencia en el cual ninguna de las dos torres involucradas pueda recibir el producto, situación que sería poco probable y se materializaría en el caso de un arrastre de catalizador que genere un contenido de cenizas superior a 0,6 % peso. Es por esta razón, que durante escenarios de arrancada y parada el Slurry producto deberá estar alineado a los intercambiadores E-523AB y E-525 ya que en estos casos el sistema aún no se ha estabilizado y el arrastre de catalizador es mayor que en condiciones normales de operación. Se resalta que según los operadores el escenario de un arrastre de catalizador significativo durante condiciones normales de operación es poco probable.

## Apéndice E. Beneficios esperados

El procesamiento de Slurry en la torre de destilación al vacío contribuye al objetivo establecido para disminuir a 20 KBPD la producción de fuel oil. Reducción que ocurre como consecuencia de la resta del Slurry cargado en la torre al Slurry destinado para la preparación de este combustible. De igual forma, con la implementación de esta iniciativa se espera un aumento en el índice de conversión que actualmente tiene un valor de 86% en la refinería. Lo anterior, debido a la obtención de un mayor volumen de productos en la torre 205 (gasóleos y asfalto) y a la reducción en los niveles de fuel oil generados.

$$\% \text{ de conversión} = \frac{\text{crudo de carga} - \text{producción de fuel oil}}{\text{crudo de carga}} * 100\% \quad \text{Ecuación 2}$$

### Análisis económico preliminar

Considerando el procesamiento de 2,5 KBPD de Slurry y contemplando un rendimiento 50%-50% de gasóleos-fondos de vacío, el beneficio económico esperado al generar productos de mayor valor agregado es de 18 M USD/año. Valor que fue proyectado con los siguientes parámetros:

1. Diferencial de asfalto nacional Vs. fuel oil: 24 USD/barril
2. Diferencial de gasóleo Vs. fuel oil: 17 USD/barril (Ecopetrol, 2019)

Beneficio: (24 USD/barril \* 1250 barril/día) + (17 USD/barril \* 1250 barril/día) = 50 K USD/día

Por otro lado, a continuación, se presentan los recursos demandados para la implementación de la iniciativa:

Tabla 8.

*Presupuesto para la implementación del procesamiento de Slurry en T-205 – Fuente: Análisis de factibilidad para administración de cambios en nuevos activos industriales-Ecopetrol*

<b>Descripción</b>	<b>Costo [USD]</b>
Materiales	85.000
Montaje	60.000
Ingenierías, estudios	20.000
<b>TOTAL</b>	<b>165.000</b>