

**Estudio de factibilidad operacional del procesamiento de slurry para reducir la  
producción de combustóleo en la Refinería de Barrancabermeja**

**Yelitza Del Pilar Rozo Areniz**

**Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Química**

**Director**

**Hernando Guerrero Amaya**

**PhD. Ingeniería Química**

**Codirector**

**Juan Carlos Arias Molina**

**MSc. Ingeniería Química - Ecopetrol S.A**

**Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Bucaramanga**

**2021**

### **Agradecimientos**

A Dios y a la Santísima Virgen María quienes me han dado la sabiduría y fortaleza necesaria para poder concluir mi carrera.

A mis padres Nidia Esther Areniz Cano y José Enrique Rozo Gil, los cuales son la razón de mi vida y gracias a ellos por el amor, apoyo incondicional, consejos y paciencia puedo alcanzar este primer logro a nivel profesional; Por ustedes y para ustedes.

A la Universidad Industrial de Santander y sus docentes por todos los aprendizajes impartidos de manera integral durante mi formación profesional.

A la compañía petrolera Ecopetrol S.A por permitirme complementar mi formación académica con la experiencia, las enseñanzas de todo su talento humano y el fortalecimiento de las relaciones personales.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Cuerpo del trabajo.....	15
2.1 Marco Referencial.....	15
2.1.1 Descripción general del proceso en la unidad 2100 del área refinación de crudos .....	16
2.1.2 Aprovechamiento del Slurry proveniente del craqueo catalítico fluidizado.....	20
2.2 Metodología .....	22
2.2.1 FASE I: Estudio del sistema actual, características y forma de operación en el área Refinación de Crudos.....	22
2.2.2 FASE II: Procesamiento del Slurry en la Sección de vacío de la U-2100.....	24
2.2.3 FASE III: Evaluación y análisis de resultados.....	25
2.3 Resultados .....	27
2.3.1 Evaluación técnica para el procesamiento del Slurry en la torre de vacío 2103.....	31
2.3.2. Alternativas para la definición de la procedencia del Slurry de carga.....	32
2.3.2.1. Alternativa 1: Cargar el Slurry desde los tanques de almacenamiento.....	32
2.3.2.2. Alternativa 2: Cargar el Slurry desde la salida de la torre T-501 en la unidad de Orthoflow.....	33

2.3.3. Alternativas para el lugar óptimo de cargue a la torre T-2103 .....	33
2.3.3.1. Alternativa 1: Cargar el Slurry antes del sensor de temperatura TI2101-33. ....	34
2.3.3.2. Alternativa 2: Cargar el Slurry al sistema de reciclo caliente de GPV.....	35
2.3.3.3 Alternativa 3: Cargar el Slurry por la boquilla N-16 modificando su diámetro de 2” a 12”. .....	36
2.3.3.4 Alternativa 4: Cargar el Slurry pasando por nuevo tambor flash a T-2103.....	37
2.3.4. Análisis de las corrientes de entrada.....	39
2.3.5. Análisis de sensibilidad a las variables de operación .....	44
2.3.5.1. Influencia del Flujo de Slurry procesado. ....	44
2.3.5.2. Influencia del vapor de despojo. ....	46
2.3.5.3. Influencia de la variación en el API del Slurry de carga. ....	49
2.3.5.4. Influencia del Slurry en la composición de los productos obtenidos.....	52
2.3.6. Análisis hidráulico del sistema propuesto.....	54
3. Conclusiones.....	59
4. Recomendaciones .....	62
Referencias bibliográficas.....	63
Apéndices.....	66

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Configuración de la torre de vacío T-2103</i> .....	19
Tabla 2. <i>Actividades desarrolladas en la práctica empresarial Ecopetrol S.A</i> .....	26
Tabla 3. <i>Caracterización de los Gasóleos de vacío de la T-2103</i> .....	27
Tabla 4. <i>Caracterización de los fondos de vacío de la T-2103</i> .....	28
Tabla 5. <i>Caracterización del Crudo Reducido de la T-2101</i> .....	40
Tabla 6. <i>Caracterización representativa para las corrientes de Slurry de Orthoflow</i> .....	41
Tabla 7. <i>Condiciones de entrada para la simulación</i> .....	42
Tabla 8. <i>Variables manipuladas y controladas para el procesamiento del Slurry</i> .....	42
Tabla 9. <i>Análisis SARA para el Slurry proveniente de Orthoflow</i> .....	533
Tabla 10. <i>Condiciones de diseño bomba P-526 A/B</i> .....	56
Tabla 11. <i>Condiciones de diseño bomba P-2112 C/D</i> .....	577
Tabla 12. <i>Presupuesto para la implementación del procesamiento de Slurry en la T-2103</i> .....	67
Tabla 13. <i>Resultados circuito de cargue Slurry desde la P-526 hasta la T-2103</i> .....	70

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Esquema del proceso planteado</i> .....	14
Figura 2. <i>Esquema general de la torre de vacío 2103</i> .....	18
Figura 3. <i>Esquema actual direccionamiento del Slurry en la Refinería</i> .....	21
Figura 4. <i>Esquema metodológico del proyecto</i> .....	22
Figura 5. <i>Curvas de destilación para el GLV</i> .....	28
Figura 6. <i>Curvas de destilación para el GPV</i> .....	29
Figura 7. <i>Desviaciones obtenidas en la simulación del caso base</i> .....	30
Figura 8. <i>Circuito de cargue de Slurry antes del sensor TI2101-33</i> .....	34
Figura 9. <i>Circuito de cargue de Slurry al sistema de reciclo caliente de GPV</i> .....	36
Figura 10. <i>Boquilla N-16 en plano mecánico de la T-2103</i> .....	37
Figura 11. <i>Circuito de cargue de Slurry a través de Tambor Flash</i> .....	38
Figura 12. <i>Curva de destilación para el Crudo Reducido</i> .....	40
Figura 13. <i>Curva de destilación para el Slurry, a diferentes condiciones de Gravedad API</i> .....	41
Figura 14. <i>Configuración del flowsheet utilizada en el Software Aspen Hysys V.10.0</i> ....	43
Figura 15. <i>Configuración del sub -flowsheet utilizada en el software Aspen Hysys V.10.0</i> .....	43
Figura 16. <i>Tendencias de los Fondos de vacío en función del flujo de Slurry procesado (Flujo de vapor constante: 2186 lb/h )</i> .....	45
Figura 17. <i>Tendencia del IBP de los fondos de vacío</i> .....	45

Figura 18. <i>Tendencia de la Gravedad API de los Gasóleos de vacío en función del flujo de Slurry procesado</i> .....	46
Figura 19. <i>Tendencias del rendimiento en los Gasóleos de Vacío en función del Flujo de vapor de despojo</i> .....	47
Figura 20. <i>Calor cedido por el intercambiador de calor E-2110 A/B en función del flujo de vapor de despojo</i> .....	48
Figura 21. <i>Temperatura inicial de ebullición para los fondos de vacío en función del flujo de vapor de despojo</i> .....	49
Figura 22. <i>IBP para los fondos de vacío en función del flujo de Slurry (°API de 7,7).....</i>	50
Figura 23. <i>Influencia de la variación del °API en función del flujo de Slurry procesado para el GPV</i> .....	51
Figura 24. <i>Influencia de la variación del °API en función del flujo de Slurry procesado para los FDV.....</i>	51
Figura 25. <i>Circuito de cargue Slurry desde la P-526 hasta la T-2103.....</i>	69
Figura 26. <i>Perfil de velocidad de la línea de 3”</i> .....	71
Figura 27. <i>Dimensionamiento de la válvula de control requerida</i> .....	72
Figura 28. <i>Dimensionamiento de la platina de orificio requerida</i> .....	733

**Lista de Apéndices**

Apéndice A Análisis de Factibilidad para el Control de Cambios en la Planta.....	66
Apéndice B Chequeo hidráulico para el circuito de envío de Slurry desde el fondo de T-501 hasta la T-2103.....	68

**Abreviaturas**

<b>GRB</b>	Gerencia Refinería de Barrancabermeja
<b>ICR</b>	Índice de Conversión de Refinería
<b>KBPD</b>	Mil de barriles por día
<b>BPD</b>	Barriles por día
<b>API</b>	American Petroleum Institute
<b>OMI</b>	Organización Marítima Internacional
<b>MARPOL</b>	Marine Pollution
<b>ACPM</b>	Aceite Combustible Para Motores
<b>GOA</b>	Gasóleo atmosférico
<b>U-2100</b>	Unidad de Topping en el área Refinación de Crudos
<b>T-2101</b>	Torre de destilación atmosférica de la U-2100
<b>T-2103</b>	Torre de destilación al vacío de la U-2100
<b>U-500</b>	Unidad de Craqueo Catalítico Orthoflow
<b>T-501</b>	Torre fraccionadora de la U-500
<b>GLV</b>	Gasóleo Liviano de Vacío
<b>GPV</b>	Gasóleo Pesado de Vacío
<b>FDV</b>	Fondos de vacío
<b>FFC</b>	Fluid Catalytic Cracking
<b>ALC</b>	Aceite liviano de ciclo
<b>GLP</b>	Gas licuado del petróleo
<b>DAP</b>	Unidad de desasfaltado con Propano
<b>DEMEX</b>	Unidad de desasfaltado con Solvente (propano-butano)
<b>ICP</b>	Instituto Colombiano del Petróleo
<b>IBP</b>	Initial Boiling Point
<b>MMBTU</b>	Millones de unidades térmicas británicas
<b>SARA</b>	Análisis de Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos

### Resumen

**Título:** Estudio de factibilidad operacional del procesamiento de slurry para reducir la producción de combustóleo en la Refinería de Barrancabermeja \*

**Autor:** Yelitza Del Pilar Rozo Areniz \*\*

**Palabras Clave:** Destilación al vacío, Slurry, fondos de vacío, gasóleos de vacío, asfalto, combustóleo.

**Descripción:** Ecopetrol S.A. es la primera compañía de Colombia que participa en todos los eslabones de la cadena productiva de hidrocarburos que produce energía de manera sostenible y como parte de este compromiso se destaca su responsabilidad con el medio ambiente, para comercializar combustibles de altos estándares de calidad, en cuanto al cumplimiento de normativas ambientales y su adecuado abastecimiento. El principal reto que enfrenta es la producción de combustibles marinos como el combustóleo, debido a la entrada de reglamentaciones estipuladas por la OMI, a través del convenio MARPOL, donde se limita el contenido de azufre en este compuesto, para la reducción de la contaminación marítima. En este sentido, surge la alternativa de reestructurar la producción de combustóleo, contemplando retirar uno de sus componentes denominado Slurry y direccionarlo hacia la unidad 2100 del área Refinación de crudos de la Refinería de Barrancabermeja para su procesamiento en la torre de destilación al vacío 2103. En la presente evaluación, se realiza la simulación de la sección de vacío de la unidad, en el software Aspen Hysys, con el objetivo de analizar las tendencias obtenidas y presentar el mejor escenario operacional estableciendo los requerimientos y adecuaciones necesarios, donde se determinó que con la implementación de esta iniciativa se logra la disminución de 2,5 KBPD de combustóleo, con mejor rendimiento en los gasóleos generados y un fondo rico en asfaltenos con propiedades fisicoquímicas adecuadas para preparar un asfalto premium, que garantice un aumento del índice de Conversión de la Refinería concluyendo que la alternativa es viable en términos operativos y económicos con un beneficio esperado de 15 MUSD/año.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Hernando Guerrero Amaya. PhD. Ingeniería Química. Codirector: Juan Carlos Arias Molina. MSc. Ingeniería Química.

### Abstract

**Title:** Operational practicality study of slurry processing to reduce fuel production at the Barrancabermeja Refinery.\*

**Author:** Yelitza Del Pilar Rozo Areniz\*\*

**Key Words:** Vacuum distillation, Slurry, vacuum bottoms, vacuum gas oils, asphalt, fuel oil.

#### Description:

Ecopetrol S.A. is the first company in Colombia that takes part in all links of hydrocarbons commodity chain to produce energy in a sustainable way, its responsibility to the environment is highlighted as a part of this commitment to commercialize fuels of high-quality standards, regarding compliance with environmental regulations and its adequate supply. The principal challenge it faces is the production of marine fuels such as fuel oil, due to the input of regulations stipulated by the IMO, through the MARPOL convention where the content of sulfur in this compound is limited to reduce marine pollution. In that regard, the alternative of restructuring the production of fuel oil arises, contemplating the removal one of its components known as Slurry and directing it to unit 2100 of the Crude refining area of the Barrancabermeja Refinery for processing in the 2103 vacuum distillation tower. In this evaluation, the unit vacuum section's simulation is carried out in the Aspen Hysys software, in order to analyze the trends obtained and present the best operational scenario, establishing the requirements and necessary adjustments where it was determined that the execution of this initiative achieves a reduction of 2.5 KBPD of fuel oil with a better performance in the diesel generated and a rich bottom in asphaltenes with adequate physicochemical properties to develop a premium asphalt which guarantees an increase in the Refinery Conversion Index concluding that the alternative is viable in operational and economic terms with an expected profit of 15 MUSD/year.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Hernando Guerrero Amaya. PhD. Chemical Engineering. Co-director: Juan Carlos Arias Molina. MSc. Chemical Engineering.

## Introducción

Ecopetrol S.A es actualmente la principal compañía petrolera en Colombia, con una utilidad neta de \$ 15,4 billones registrada en 2011; Dedicada a la generación de valor con el portafolio de crudos nacionales a partir de la exploración, producción, refinación, transporte y comercialización dentro del sector Oíl & Gas (Ecopetrol S.A, 2014). En cuanto al área de refinación, se encuentra el complejo industrial de la Refinería de Barrancabermeja o GRB, que cuenta con un índice de conversión de refinería (ICR) aproximado del 87 % y una capacidad máxima de procesamiento de 250 mil barriles de crudo al día generando diversos productos de manera eficiente, rentable y segura cubriendo de esta forma el 75 % de la demanda de combustibles del país (García, 2020).

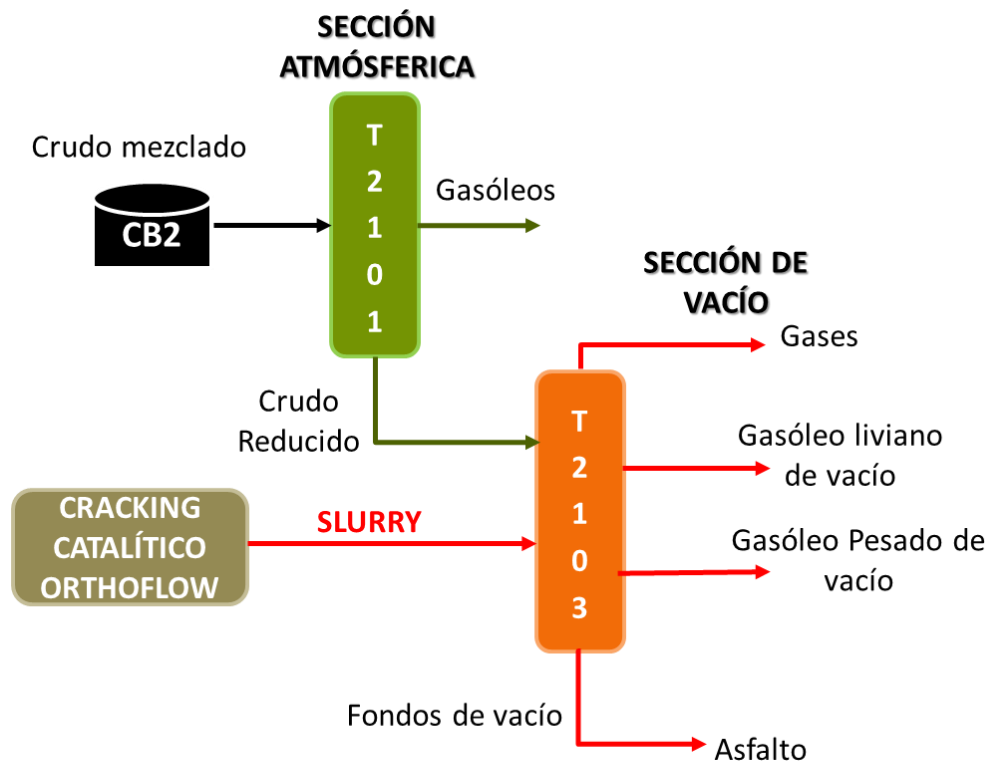
La GRB carga 12 diferentes calidades de crudos entre 18 y 36°API, en línea los crudos se mezclan y las dietas se configuran a partir de ensayos de caracterización en laboratorio con el propósito de que sean estables en proporción y volumen, favorezcan el control de las variables de integridad y calidad de las plantas, produzcan mayores rendimientos, aporten el mayor margen económico y disminuyan la producción de combustóleo (Ecopetrol Oficial, 2020)

En función de incrementar la rentabilidad, uno de los objetivos planteados, es realizar modificaciones en el proceso de combustóleo o fuel oíl, para disminuir su producción desde 32 KBPD a 20 KBPD, porque al tener un coste de comercialización menor al crudo, no ofrece utilidad respecto a productos como combustibles y petroquímicos que tienen una mayor demanda. Así mismo, esta premisa implica cumplir con la normatividad exigida por la OMI, la cual por medio del Convenio conocido como MARPOL, en el Anexo VI, establece un límite mundial en contenido de azufre en el fuel oíl de 0.50 % masa/masa a partir del 1 de enero de 2020, para reducir considerablemente la contaminación atmosférica ocasionada por el transporte

marítimo (OMI, 2019) . Esta reducción tiene un efecto significativo en los intereses económicos de la compañía, ya que para lograr las concentraciones permitidas se hace necesario la utilización de diluyentes o la transformación de los procesos empleados, lo que significa que se deben implementar medidas que controlen los niveles de producción de este compuesto o en su defecto la disminuyan.

No obstante, las iniciativas en operación para el aprovechamiento del Slurry no son suficientes debido a factores críticos presentes en esta corriente como lo es el alto contenido de sólidos azufrados disueltos con elementos pesados como níquel y vanadio, producto del desprendimiento de partículas del catalizador, que genera erosiones y daños importantes en las líneas de conexión y en los equipos involucrados.

En ese mismo sentido surge la necesidad de analizar diferentes alternativas, entre ellas, un mejor aprovechamiento del Slurry, ya que al utilizar este compuesto con alto contenido de azufre y metales en la preparación del combustóleo genera inconvenientes en el cumplimiento de las especificaciones del convenio para la calidad ambiental del producto. Por lo tanto, aunque la unidad 2100 se encuentre operando de forma estable, surge la necesidad de un ajuste al proceso para contribuir a la situación mencionada y alcanzar el objetivo de la disminución de fuel oil contemplando un mejor direccionamiento del Slurry proveniente de la U-500 (referida como Orthoflow), orientando esta corriente hacia la línea de alimentación de la torre de vacío T-2103, en el área de refinación de crudos tal como se indica en la figura 1, adaptando el sistema existente a un ajuste del proceso con el fin de extraer una mayor cantidad de gasóleos, que cumplan con las especificaciones de alimentación a las unidades de craqueo catalítico y generar un fondo rico en asfaltenos con propiedades fisicoquímicas adecuadas para preparar un asfalto premium que garantice un aumento del índice de Conversión de la Refinería.

**Figura 1.***Esquema del proceso planteado*

Con referencia a lo anterior, el presente proyecto se enfocará en realizar un análisis con propósito de conocer la viabilidad operacional y técnica, donde se establezcan las condiciones óptimas de operación y las facilidades de conexión requeridas, por medio de la simulación de la planta en un software especializado y se evalúe el impacto en la calidad de los productos obtenidos como consecuencia del procesamiento del Slurry.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar la factibilidad operacional del cargue parcial de Slurry a la torre de vacío T-2103 de la U-2100, para reducir la producción de combustóleo en la Refinería de Barrancabermeja.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Modelar la torre de vacío T-2103, bajo las condiciones actuales del proceso mediante un software especializado.

Estimar los valores adecuados de las condiciones de operación en función del rendimiento de gasóleos y fondos de vacío para el cargue de Slurry a la torre T-2103.

Identificar las adecuaciones y facilidades de conexión necesarias en el sistema actual, que permitan el correcto procesamiento del Slurry en la torre de vacío.

## **2. Cuerpo del Trabajo**

### **2.1 Marco Referencial**

La refinería de Barrancabermeja cuenta con cinco unidades topping en el área de refinación de crudos, donde se lleva a cabo una operación unitaria conocida como destilación, que consta en la separación de componentes, aprovechando la diferencia entre los puntos de ebullición y volatilidad de estos (Trambouze, 2000). Cada unidad se compone de dos secciones de destilación, una atmosférica y una de vacío. En la sección atmosférica se obtienen como productos Gases, Nafta, Jet A1, ACPM, Gasóleo atmosférico (GOA) y crudo reducido como fondo, este último se alimenta a la sección de vacío, donde se convierte en gasóleos para carga

en las unidades de cracking e hidrocracking moderada y fondos de vacío para la preparación de asfalto y fuel oíl tipo exportación (Ecopetrol S.A, 2020).

De manera general hay dos tipos de torres de vacío: combustible y lubricante. Los principios de operación son similares con la diferencia de que la torre de lubricantes exige condiciones operativas más rigurosas y una cantidad de platos superior debido a las especificaciones de sus productos. En las torres de vacío de combustible, se procesa el crudo reducido para generar gasóleos que son enviados para ser transformados en productos de mayor valor en unidades de conversión, como craqueo catalítico y fondos de vacío orientados a diferentes procesos como extracción líquido-líquido, preparación de crudos reconstituidos y asfalto (Ruiz et al.,2013).

### ***2.1.1 Descripción general del proceso en la unidad 2100 del área refinación de crudos***

La U-2100 es la unidad de Topping más moderna de la refinería y corresponde a una destilación combinada, compuesta por la torre atmosférica T-2101 y la torre al vacío T-2103. La carga aproximada de la unidad es 37 KBPD de Crudo Mezclado provenientes de los campos Cusiana y Cupiagua, con características entre 22 y 26 °API. En la actualidad la mezcla está compuesta por crudos livianos en un 30 % y crudos pesados en un 70 %.

El proceso inicia cuando el crudo es sometido a un pretratamiento por medio de un primer tren de intercambiadores de calor, que elevan la temperatura para su posterior operación en los desaladores cuyo objetivo es remover impurezas como sales y sedimentos. El crudo desalado pasa hacia el segundo tren de intercambio de calor con propósito de alcanzar la temperatura para entrar al horno atmosférico, el cual cumple la función de transmitir la energía necesaria para facilitar su vaporización parcialmente e ingresarlo a la torre atmosférica 2101 y de esta manera recuperar productos valiosos como gases, Nafta Virgen, Jet A1, ACPM, Gasóleo

atmosférico (GOA) y crudo reducido como fondo, el cual es dirigido al horno de vacío, donde se incrementa la temperatura y es alimentado por la línea de transferencia a la torre de vacío 2103, para producir Gasóleo Liviano de Vacío (GLV), Gasóleo Pesado de Vacío (GPV) y Fondos de vacío (FDV) (Ecopetrol S.A, 2008).

El objetivo de la torre de vacío T-2103, es recobrar gasóleos provenientes de la torre atmosférica T-2101 sin ocasionar “cracking” (ruptura) significativo en los hidrocarburos. Para alcanzar esto la torre trabaja con presiones reducidas, lo que permite operar con temperaturas elevadas para el fraccionamiento de los componentes pesados del crudo reducido sin superar el límite de descomposición térmica (“Procesos de destilación atmosférica de crudos y al vacío”,2007).

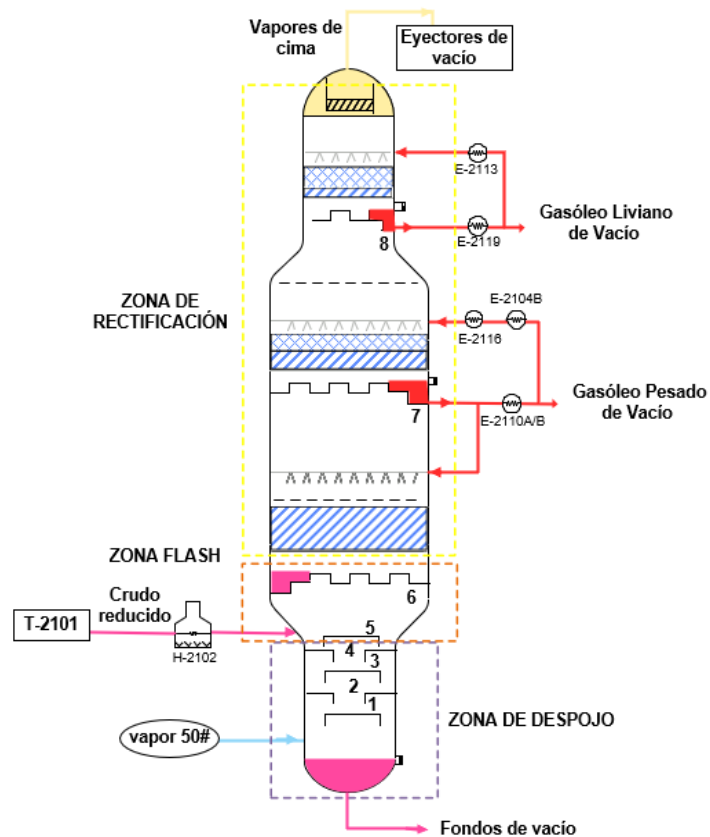
La presión de vacío en la torre se logra por medio de un circuito de eyectores de vacío lo cuales emplean el principio de Venturi para crear succión en los vapores a partir del condensador. La operación consiste en la inyección de vapor de alta presión a un difusor, donde el vapor se acelera a medida que el difusor se vuelve más estrecho y al incrementar la velocidad del vapor, su presión disminuye. De esta forma colocando eyectores en etapas consecutivas, se puede obtener una presión de succión de hasta 20 mmHg en la cima de la torre (Ecopetrol S.A, 2008).

En la figura 2 se presenta el esquema general de la torre de destilación 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 16 ft, por donde ingresa la corriente de alimentación, como consecuencia de la caída drástica de presión que experimenta el crudo se presenta un cambio de fase donde la parte vaporizada asciende por la torre, mientras la parte líquida por acción de la gravedad va hacia los platos del fondo.

La zona de despojo con un diámetro de 9,5 ft corresponde a la parte inferior 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 3 mallas tipo Glitsch de material SS 316 L 4" y dos zonas empacadas con anillos Ballast Plus combinados. En esta zona a medida que la temperatura en la torre se reduce, los vapores de hidrocarburo se condensan mediante los reflujo externos y los internos produciendo corrientes laterales líquidas, que se recuperan en los platos colectores de salida (Ecopetrol S.A, 2008).

### Figura 2.

*Esquema general de la torre de vacío 2103*



Nota: Adaptado del Manual de descripción de procesos de la unidad de Crudos U-2100 -

Ecopetrol S.A.

La torre de vacío T-2103 posee una altura de 71 ft y cuenta con capacidad máxima para procesar 24 KBPD de crudo reducido proveniente de la T-2101. Actualmente procesa alrededor de 20 KBPD y sus principales productos como los gasóleos de vacío son enviados a unidades de craqueo catalítico fluidizado, mientras que los fondos de vacío son dirigidos en su totalidad a la preparación de asfalto. En la tabla 1 se observan los parámetros de configuración de la torre.

**Tabla 1.**

*Configuración de la torre de vacío T-2103*

DESCRIPCIÓN		PARÁMETRO
	1-4	Zona de despojo
Platos*	5	Zona flash
	6-8	Colectores
Lechos	1 malla	
Malla:	y 1 zona	Fraccionamiento zona liviano (114 in)
Glitsch	empacada	
Empaque:	1 malla	
Anillos Ballast	y 1 zona	Fraccionamiento zona pesado (192 in)
Pluss combinados	empacada	
	1 malla	Zona reciclo
Tipo de condensador		Sin condensador, el GLV del pumpa round retorna a la cima.
Tipo de rehervidor		Sin rehervidor, inyección de vapor directa de 50 psi

Nota: \*Numeración de fondo a cima

### ***2.1.2 Aprovechamiento del Slurry proveniente del craqueo catalítico fluidizado***

Los productos de las columnas de destilación se envían a procesos posteriores en la refinería para su conversión en productos finales de mayor valor agregado, uno de estos son las de craqueo catalítico fluidizado (FFC por sus siglas en inglés). En la refinería existen cuatro unidades de ruptura catalítica denominadas Orthoflow, Modelo IV, UOP 1 y UOP 2. El Cracking catalítico es un proceso de ruptura para conversión de fracciones pesadas de hidrocarburos en productos más livianos haciendo uso de un catalizador zeolítico, el cual se comporta como un fluido cuando está aireado con vapor o aire.

Los productos en estas unidades son Nafta craqueada, Aceite liviano de ciclo (ALC), Gas licuado del petróleo (GLP), Propileno, Etano etileno y una corriente de residuo denominada Slurry.

Esta mezcla de residuo es una suspensión aceitosa con compuestos craqueados, alto contenido de azufre y restos del catalizador utilizado en el proceso. El Slurry es el principal precursor del combustóleo, producto compuesto de una mezcla de hidrocarburos pesados, de bajo valor comercial utilizado como combustible industrial para el transporte marítimo, que disminuye el porcentaje de conversión de la refinería (Ecopetrol S.A, 2008).

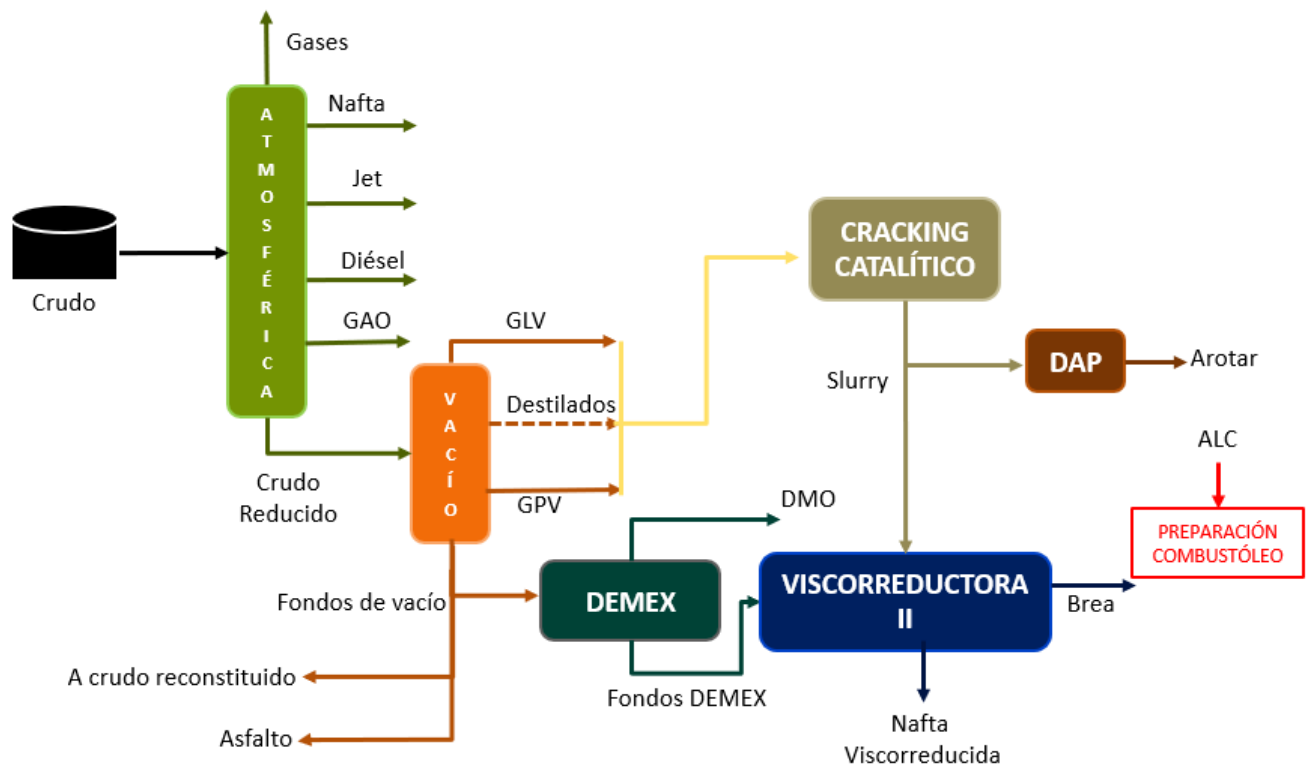
Actualmente el direccionamiento del Slurry en la refinería se lleva a cabo mediante dos procesos principales como se indica en la figura 3. El primero corresponde a un cargue de este compuesto desde los tanques de almacenamiento, hacia la unidad U-1000 de desfaltado con propano (DAP) el cual, mediante una extracción líquido-líquido del Slurry con un solvente rico en propano y olefinas, permite la formulación de un asfalto mejorado denominado AROTAR; producto 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. (Ecopetrol S.A, 2008).

Así mismo, el balance de este Slurry es enviado a la unidad Viscorreductora II, proceso de descomposición de fondos de vacío y/o fondos DEMEX, a través de una exposición a altas temperaturas, para producir gases y líquidos más livianos; consecutivamente se mezcla con la brea, el aceite liviano de ciclo (ALC) y se envía a blending de productos para obtener combustóleo, donde se asegure la calidad en especificaciones con la cantidad y oportunidad requerida del mercado (Ecopetrol S.A, 2008).

**Figura 3.**

*Esquema actual direccionamiento del Slurry en la Refinería*

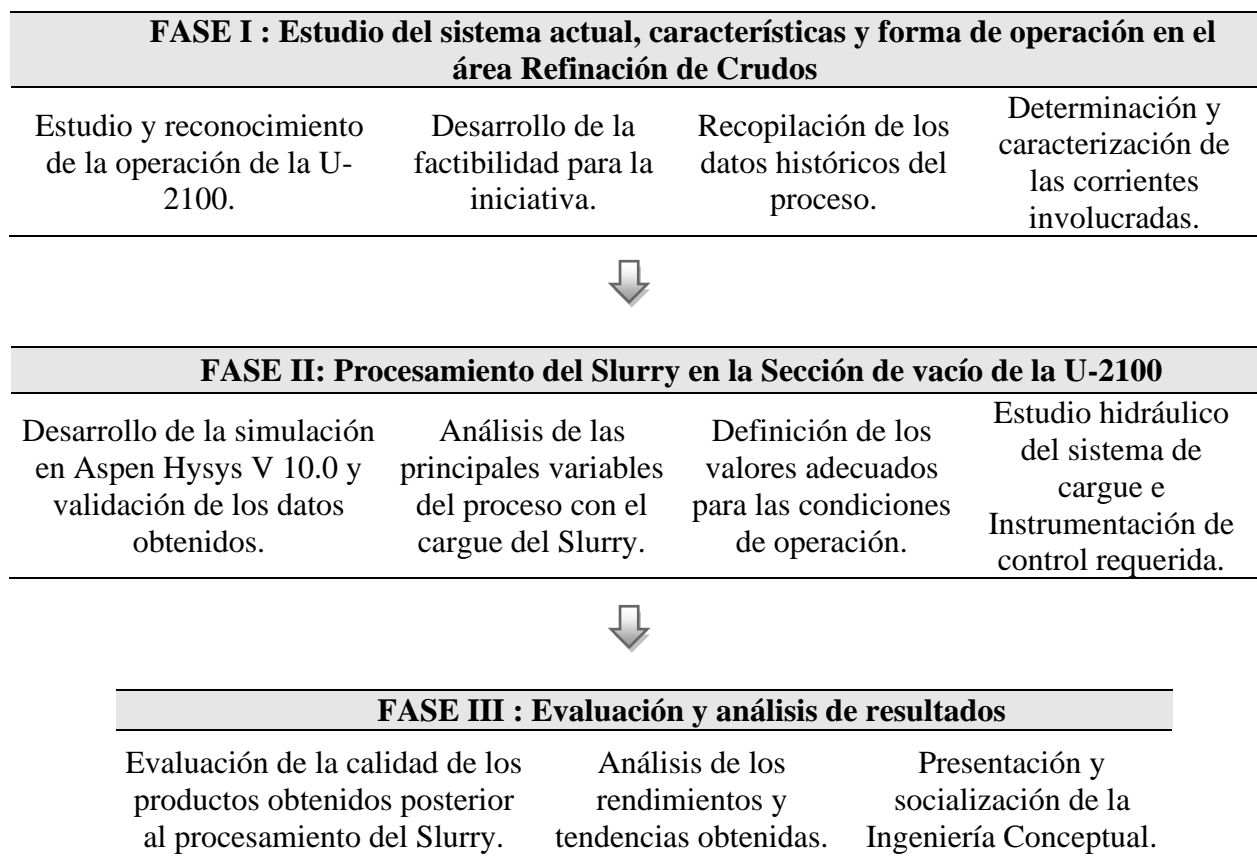


## 2.2 Metodología

Para llevar a cabo el desarrollo de los objetivos planteados en el siguiente trabajo se establecieron 3 fases metodológicas, que fueron ejecutadas durante la práctica empresarial.

### Figura 4.

*Esquema metodológico del proyecto*



### 2.2.1 FASE I: *Estudio del sistema actual, características y forma de operación en el área Refinación de Crudos*

- Estudio y reconocimiento de la operación de la U-2100

Con propósito de conocer el proceso industrial se realiza un estudio bibliográfico de la Unidad 2100, mediante la lectura de los manuales de operación, diagramas de tuberías e instrumentos (P&ID), planos y tablas de datos (datasheets) de cada equipo de la unidad. Así mismo la realización de una inspección visual a la planta para la verificación de la información general del proceso.

- Desarrollo de la factibilidad para la iniciativa de reducción de combustóleo en la U-2100.

Se realiza de manera general la descripción del sistema actual correspondiente al direccionamiento del Slurry, la descripción del sistema propuesto, su principal objetivo de requerimiento, los beneficios esperados con la implementación y la estimación de costos de la iniciativa el producto de este ejercicio se presenta en el apéndice A.

- Recopilación de los datos históricos e información técnica del proceso

A través de la herramienta PI System del Sistema de Control Distribuido (DCS) de la GRB, se recopilan los datos históricos para cada variable representativa del proceso (flujos, temperaturas, presiones) con las condiciones de operación establecidas en la torre de destilación al vacío T-2103.

- Determinación y caracterización de las corrientes de la torre T-2103 y el Slurry proveniente de Orthoflow

Se establece la estructura entrada-salida de la torre T-2103, con el fin de identificar las corrientes involucradas para su posterior caracterización respectiva y así obtener la información base de las corrientes implicadas en el proceso.

### ***2.2.2 FASE II: Procesamiento del Slurry en la Sección de vacío de la U-2100***

- Desarrollo de la simulación de la torre T-2103 en Aspen Hysys V 10.0 y validación de los datos obtenidos

Realización de la simulación en el Aspen Hysys V 10.0 de la torre T-2103 correspondiente a una destilación al vacío, bajo las condiciones actuales de operación para verificar posteriormente los resultados obtenidos del modelo propuesto con los datos de la base histórica.

- Análisis de las principales variables del proceso con el cargue del Slurry

Según la nueva configuración del proceso con el cargue del Slurry se ejecuta un análisis a las variables del proceso, cuyo fin es predecir el comportamiento con las tendencias obtenidas en cada una de ellas para diferentes escenarios de la torre, según las diferentes condiciones de operación utilizando el modelo logrado en la simulación.

- Definición de los valores adecuados para las condiciones de operación

Estimar las condiciones de operación para el correcto procesamiento de Slurry en la torre de vacío T-2103, que permita obtener los resultados más convenientes, para la refinería en función de los productos obtenidos.

- Estudio hidráulico del sistema de cargue de la torre T-2103 e Instrumentación de control requerida.

Por medio del software especializado Inplant 4.5, se realizó una revisión de las restricciones hidráulicas existentes en el sistema, según las nuevas condiciones de operación con propósito de que cumplan criterios de diseño y capacidad, de igual forma se establecieron los requerimientos para la instrumentación de control necesaria en el nuevo esquema de operación.

### ***2.2.3 FASE III: Evaluación y análisis de resultados***

- Evaluación de la calidad de los productos obtenidos posterior al procesamiento del Slurry.

Se analizaron los resultados obtenidos a partir del modelo propuesto a la torre, con propósito de validar el efecto del procesamiento de Slurry en la torre de vacío para la obtención de un asfalto con mejores propiedades antioxidantes.

- Análisis de los rendimientos y tendencias obtenidas en la torre T-2103

Posteriormente se evaluaron las tendencias en el rendimiento de productos como gasóleos y fondos de vacío luego de la ejecución de la alternativa.

- Presentación y socialización final de resultados

En relación con los criterios establecidos por la GRB, se hace la respectiva socialización y presentación del documento con los resultados alcanzados para el procesamiento de Slurry en la T-2103, cuyo objetivo se basa en reducir la producción de combustóleo.

En la tabla 2 se presentan las principales actividades desarrolladas durante la práctica.

**Tabla 2.***Actividades desarrolladas en la práctica empresarial Ecopetrol S.A*

<b>Temática</b>	<b>Actividades realizadas</b>
<b>FASE I</b> <b>Estudio del sistema actual, características y forma de operación en el área Refinación de Crudos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Estudio y reconocimiento de la operación de la U-2100.</li> <li>✓ Desarrollo de la factibilidad para la iniciativa en la reducción de combustóleo en la U-2100.</li> <li>✓ Recopilación de los datos históricos del proceso.</li> <li>✓ Determinación y caracterización de las corrientes de la torre T-2103 y el Slurry proveniente de Orthoflow.</li> </ul>
<b>FASE II</b> <b>Procesamiento del Slurry en la Sección de vacío de la U-2100</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Desarrollo de la simulación de la torre T-2103 en Aspen Hysys V 10.0 y validación de los datos obtenidos.</li> <li>✓ Análisis de las principales variables del proceso con el cargue del Slurry.</li> <li>✓ Definición de las condiciones de operación.</li> <li>✓ Estudio hidráulico del sistema de cargue de la torre T-2103 e Instrumentación de control requerida.</li> </ul>
<b>FASE III</b> <b>Evaluación y análisis de resultados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Evaluación de la calidad de los productos obtenidos posterior al procesamiento del Slurry.</li> <li>✓ Análisis de los rendimientos y tendencias obtenidas</li> <li>✓ Presentación y socialización final de la Ingeniería Conceptual</li> </ul>
<b>Actividades complementarias</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Programa de inducción a la práctica industrial.</li> <li>✓ Capacitación y evaluación del software <i>PIDataLink</i>.</li> <li>✓ Cursos formativos: Aprendiendo con Ecopetrol - Ética y cumplimiento.</li> <li>✓ Charlas de seguridad y fundamentos de proceso de las unidades de la GRB.</li> <li>✓ Asistencia en Análisis de riesgos ( HAZOP y What if )</li> <li>✓ Visitas a Unidades de la Refinería y Paradas de Planta.</li> </ul>

### 2.3 Resultados

Inicialmente se realizó un soporte cuantitativo de las características de carga y productos para identificar la operación en la T-2103 observado en la tabla 3 y 4.

Así mismo la revisión del sistema actual se basó en los análisis de las muestras en el laboratorio de la GRB en contraste con la simulación y sus respectivas curvas destilación presentadas en las figuras 5 y 6.

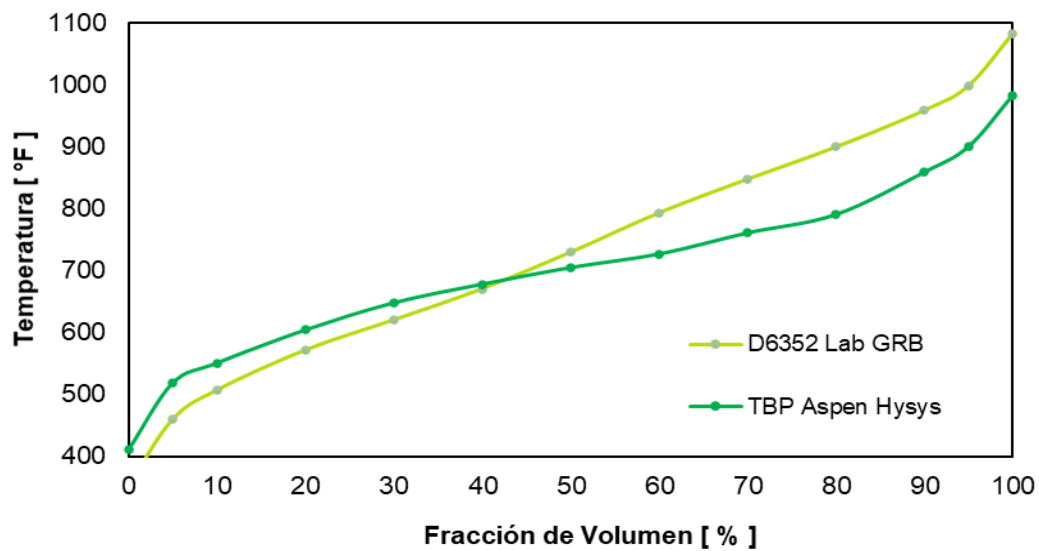
**Tabla 3.**

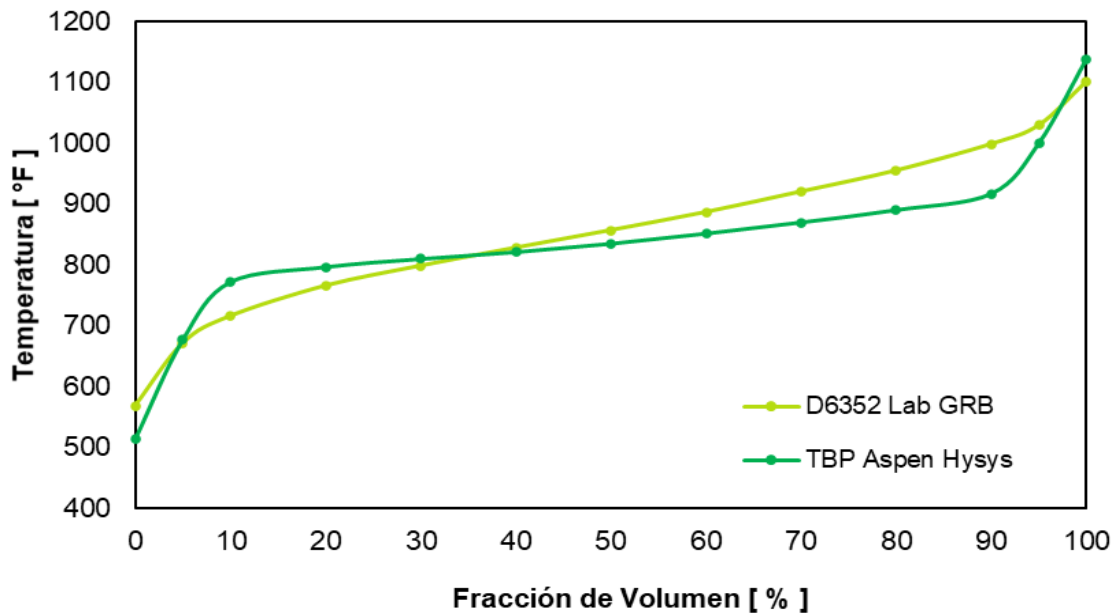
*Caracterización de los Gasóleos de vacío de la T-2103*

PROPIEDAD	Unidad de medida	GASÓLEO LIVIANO	GASÓLEO PESADO
		Valor	Valor
Níquel	ppm	0,307	0,246
Vanadio	ppm	1,12	1,12
Hierro	ppm	0,476	1,526
Sodio	ppm	0,12	0,12
Azufre	g/100g	1,093	1,198
Gravedad API	°API	22,1	19,2
Densidad a 60°F	kg/m <sup>3</sup>	920,4	937,8
Micro carbón residual	g/100g	0,2	0,36
Punto inicial de ebullición	°F	352,2	567,9
Punto final de ebullición	°F	1083	1101,6
Insolubles en n-heptano	g/100g	0,02	0,07
Número de ácido	mg KOH/g	2,05	2,87

**Tabla 4.***Caracterización de los fondos de vacío de la T-2103*

PROPIEDAD	Unidad de medida	FONDOS DE VACÍO Valor
Penetración a 77°F	mm/10	58
Número de aguja	N/A	27
Torque	%	94
Gravedad API	°API	7,7
Viscosidad a 212°F	cP	4680
Densidad a 60°F	kg/m <sup>3</sup>	1015,5
Punto de Inflamación	°F	366,8
Punto de ablandamiento	°F	90,7
Pérdida de masa RTFOT	%m	204,853

**Figura 5.***Curvas de destilación para el GLV*

**Figura 6.***Curvas de destilación para el GPV*

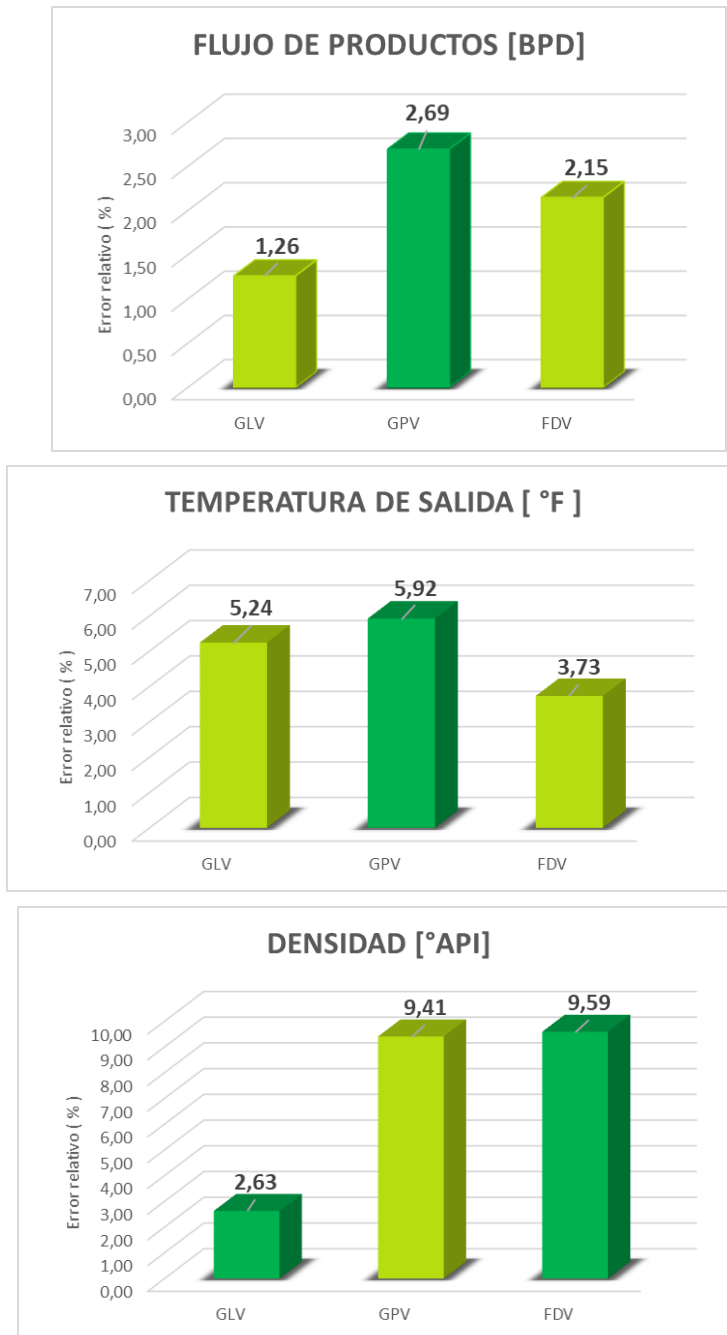
El punto de partida fue la realización de la simulación en el software especializado Aspen Hysys V 10.0, donde se desarrolló la configuración del proceso, con el propósito de predecir tendencias en la T-2103. En tal sentido se extrajeron los datos históricos del último año reportados por el software PIDataLink, y las condiciones actuales del proceso para simular la operación. El paquete termodinámico seleccionado fue Peng Robinson, puesto que presenta un buen ajuste para compuestos hipotéticos de hidrocarburos a bajas presiones como es el caso en la operación unitaria para la destilación al vacío (Coker, 2018).

La torre de vacío se simuló en dos torres, en primera instancia un destilador flash que indica la zona de vaporización instantánea o zona flash y seguidamente una torre de 8 platos ideales, los cuales representan la zona de rectificación con los platos superiores y la zona de despojo con los platos inferiores; ubicados por debajo de la entrada de la corriente de crudo

reducido proveniente del flash. A continuación, se presentan las desviaciones obtenidas de los valores como respuesta a cada variable para el caso base de estudio.

**Figura 7.**

*Desviaciones obtenidas en la simulación del caso base*



Cómo se observa en la figura 7, las desviaciones se obtuvieron al realizar un análisis de las variables como flujo, temperatura y gravedad API, donde a partir de los resultados se aprecia un buen ajuste por la estimación en el porcentaje de los errores relativos para cada corriente con un valor menor al 10 %, sin embargo, las desviaciones más significativas se encuentran en la gravedad API de los productos generados, esta variabilidad se presenta por la mezcla en dieta de crudo a la unidad. Esta desviación indica que para el presente documento los resultados se basarán en un análisis de la tendencia de esta propiedad.

### ***2.3.1 Evaluación técnica para el procesamiento del Slurry en la torre de vacío 2103***

La iniciativa consiste en el procesamiento del Slurry procedente de Orthoflow en la torre de vacío T-2103 de la U-2100. Con relación a la procedencia y torre seleccionada para la evaluación se destaca su cercanía con la unidad de Orthoflow y su disponibilidad para el proceso requerido, ya que su configuración permite la resistencia en el manejo de altas temperaturas requeridas para el procesamiento del Slurry, en ese sentido y con propósito de aprovechar la energía suministrada en la operación de craqueo catalítico se determina que esta corriente será procesada a la temperatura de salida de la fraccionadora principal (T-501), manteniendo condiciones típicas de operación y las especificaciones de calidad definidas para alimentar a las FCC.

Para realizar la evaluación técnica se establecieron parámetros para el análisis de la operación, teniendo en cuenta limitaciones y consideraciones que puedan poner en riesgo la confiabilidad de la operación esto implica que 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 que cumplan con las especificaciones requeridas para el cargue exitoso en el área de craqueo catalítico.
- Mejorar las propiedades del asfalto obtenido en la torre.

Como primera medida se presentan las diferentes alternativas de cargue consideradas en función de las premisas señaladas se deben establecer dos parámetros clave: la procedencia del Slurry de cargue a la unidad y el lugar óptimo para el cargue del Slurry seleccionado. A continuación, se presentan las alternativas consideradas

### ***2.3.2. Alternativas para la definición de la procedencia del Slurry de carga***

#### **2.3.2.1. Alternativa 1: Cargar el Slurry desde los tanques de almacenamiento.**

Obtener el Slurry directamente de los tanques K-0104 y K-0007 ubicados en casa bombas 4, donde se almacena este subproducto generado en las unidades de cracking catalítico de la refinería. La temperatura en estos recipientes es de 154,4 °F, por lo tanto, se haría necesario un sistema de calentamiento para el Slurry antes de ingresar a la torre T-2103 para su procesamiento.

De igual forma, se resalta que al realizar el cargue directamente de los tanques se ingresaría a la torre una mezcla de las corrientes de Slurry de las diferentes unidades y se deberá contemplar una posible contaminación del tanque K-0104 debido al ingreso de corrientes de lavado fuera de especificación.

### **2.3.2.2. Alternativa 2: Cargar el Slurry desde la salida de la torre T-501 en la unidad de Orthoflow.**

Teniendo en cuenta la cercanía de la unidad 2100 con la U-500, se plantea cargar el Slurry directamente de la salida de la torre T-501 hacia la torre de vacío T-2103. De esta manera, se estaría aprovechando la energía suministrada en el proceso de craqueo catalítico en la unidad de Orthoflow; ya que la corriente de Slurry se encuentra alrededor de los 640 °F, una temperatura muy próxima a la temperatura del crudo reducido a la entrada de la torre ( 676 °F ).

En este sentido gracias al sistema de separación de partículas sólidas de Orthoflow la corriente del Slurry posee una menor cantidad de impurezas en comparación con el Slurry de otras unidades, por ende, se convierte en la unidad que representa el escenario más favorecedor para su procesamiento.

Se resalta que la temperatura y el rendimiento de los gasóleos tienen un comportamiento proporcional, por lo cual, la alternativa 1 presenta el escenario más desfavorable. Por otro lado, se observa una ventaja comparativa en la alternativa 2 con respecto al contenido de impurezas en la unidad de Orthoflow y el aprovechamiento de la temperatura producto del proceso de craqueo catalítico en la U-500.

Debido a lo anterior, la alternativa seleccionada es la número 2. La cual plantea entonces orientar el Slurry procedente de la unidad Orthoflow hacia la torre de destilación al vacío T-2103 para su procesamiento de manera directa.

### **2.3.3. Alternativas para el lugar óptimo de carga a la torre T-2103**

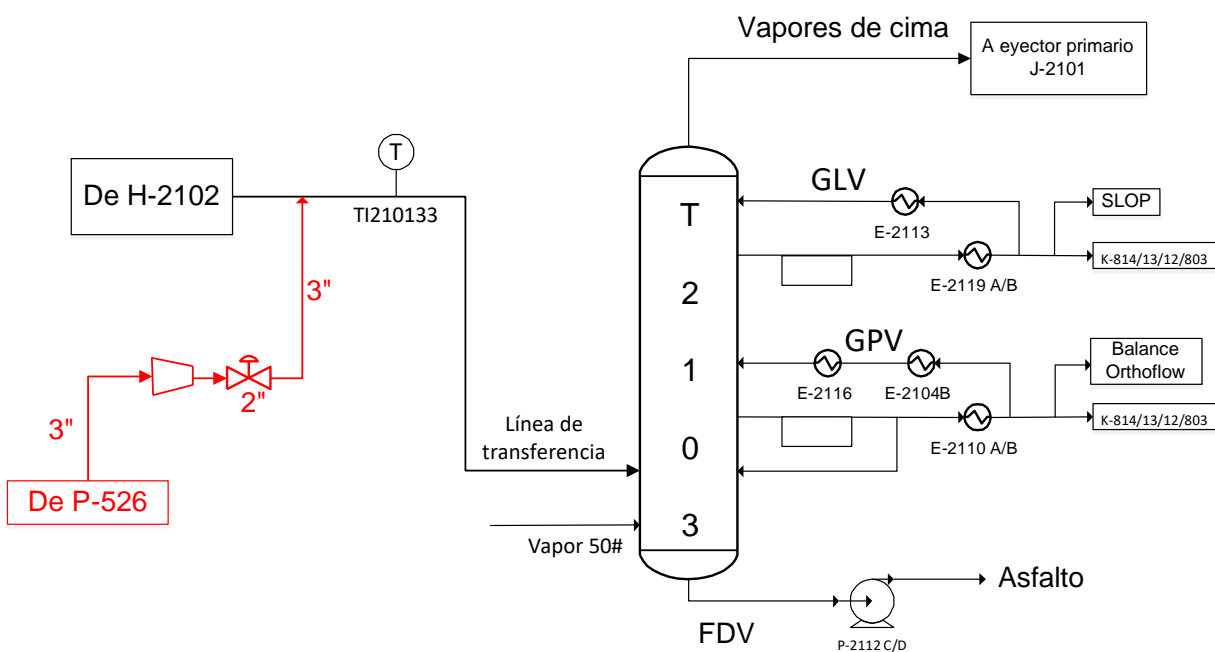
Una vez se tiene la procedencia del Slurry definida, se describen a continuación las alternativas consideradas con respecto al lugar óptimo de carga en la unidad 2100.

### 2.3.3.1. Alternativa 1: Cargar el Slurry antes del sensor de temperatura TI2101-33.

Con el fin de ingresar el Slurry a la torre por medio de la línea de transferencia, se propone cargarlo antes del sensor de temperatura TI2101-33, tal como se indica en la figura 8.

**Figura 8.**

*Circuito de cargue de Slurry antes del sensor TI2101-33*



Esta alternativa permitiría un alto rendimiento de gasóleos debido a que el Slurry ingresaría 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 por las altas velocidades (200 ft/s) en la línea de transferencia.

Con relación a lo anterior, la implementación de esta alternativa se dificulta debido a la no existencia de un sistema de separación eficiente que asegure el menor ingreso de partículas suspendidas a la línea de transferencia.

### **2.3.3.2. Alternativa 2: Cargar el Slurry al sistema de reciclo caliente de GPV.**

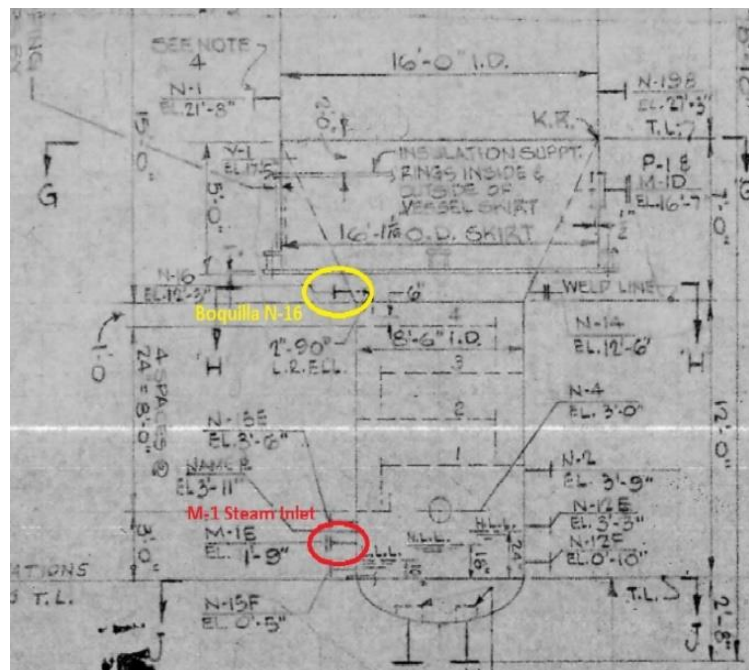
Se propone cargar el Slurry como se indica en la figura 9, al sistema de reciclo caliente de Gasóleo Pesado Vacío antes de la válvula de control FRC 2144, debido a que de esta manera podría atravesar la zona flash sin necesidad de ingresar por medio de la línea de transferencia y sin requerir la construcción 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 empacado de malla Glitsch, por lo cual el ensuciamiento representa un parámetro clave y de especial cuidado en esta alternativa. En cuanto al 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 pesados presentes en este compuesto.



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 en esta boquilla para favorecer el despojo de fracciones livianas en la misma.

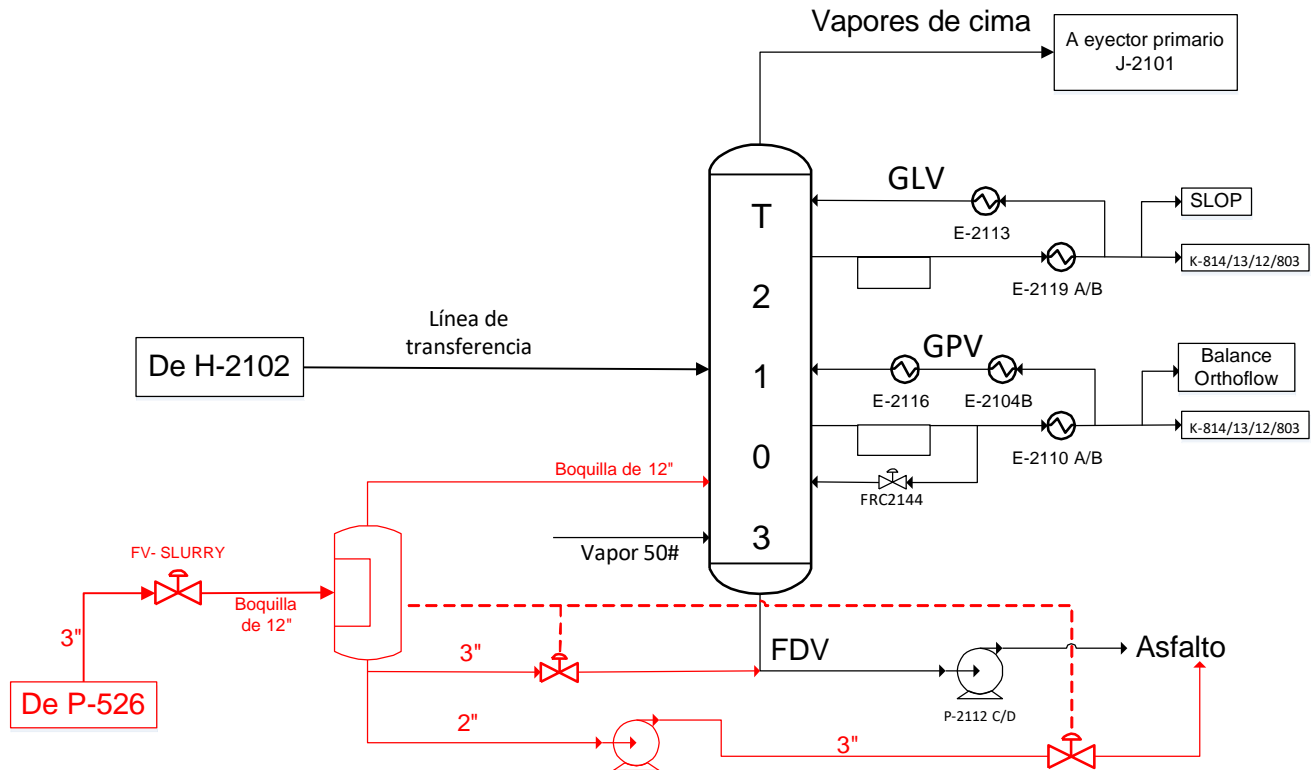
**Figura 10.**

*Boquilla N-16 en plano mecánico de la T-2103*



**2.3.3.4 Alternativa 4: Cargar el Slurry pasando por nuevo tambor flash a T-2103.**

Se propone cargar el Slurry en un nuevo tambor flash según la figura 11, donde la fracción liviana separada es conectada a la boquilla disponible N-16 modificada a 12" de la T2103, y el líquido del fondo del tambor se dirige a la succión o descarga de las bombas SP-2112 CD del fondo de la torre para mezclarse con el asfalto a tanques. Para esta alternativa dependiendo del destino definido para el Slurry despojado sería necesario un nuevo sistema de bombeo y un sistema de control de nivel y presión para el nuevo tambor.

**Figura 11.***Circuito de carga de Slurry a través de Tambor Flash*

Realizando un balance de las ventajas y desventajas mencionadas, se descarta la alternativa 2 ya que, aunque se considera de fácil implementación, compromete tanto la calidad de los gasóleos obtenidos como la integridad del empaque estructurado debido a que, al ingresar el Slurry por este sistema se incrementaría el ensuciamiento en el mismo.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la alternativa 1 representa el escenario más favorecedor con respecto al rendimiento de gasóleo en la torre, sin embargo, presenta un riesgo de corrosión-erosión con el posible ingreso de sólidos suspendidos a la línea de transferencia que maneja altas velocidades; mientras que la alternativa 3 aunque presenta un menor rendimiento de

gasóleo y supone realizar el cargue directo a la torre, no admite riesgo al realizar el cargue de forma independiente modificando el diámetro de la boquilla N-16 de 2” a 12“. De igual manera la alternativa 4 no presenta una opción factible para la implementación del sistema de cargue de Slurry a la torre T2103, porque implica un mayor alcance en la incorporación de un nuevo tambor flash y los sistemas de control de nivel, presión y bombeo requeridos.

Luego de ejecutar un estudio se define que el cargue óptimo de este subproducto se realizará de forma independiente por medio de una boquilla ubicada en la parte inferior de la zona flash de la torre modificando su diámetro de 2” a 12”. Posteriormente se realizó el análisis de los siguientes factores:

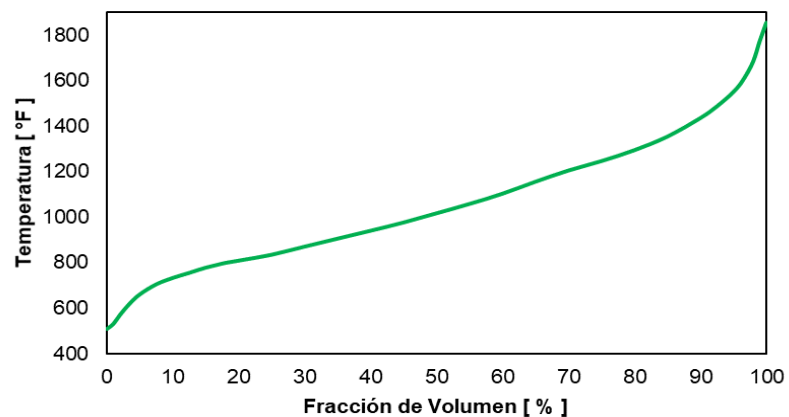
- ✓ Análisis de las corrientes de entrada
- ✓ Análisis de sensibilidad a las variables de operación
- ✓ Análisis hidráulico del sistema propuesto

#### ***2.3.4. Análisis de las corrientes de entrada***

Las corrientes de entrada involucradas en la iniciativa son el crudo reducido proveniente de la torre T-2101 y el Slurry proveniente de la torre T-501; con relación 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 dichas caracterizaciones se encuentran expuestas a continuación en las tablas 5 y 6, junto con las curvas de destilación correspondientes reportadas por el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP).

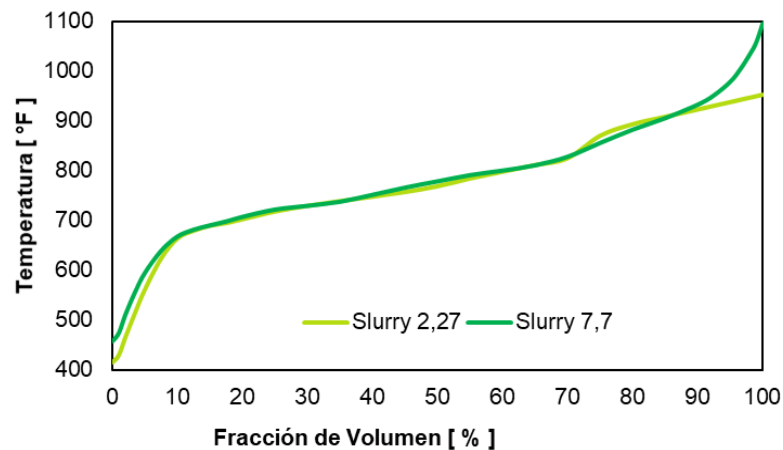
**Tabla 5.***Caracterización del Crudo Reducido de la T-2101*

PROPIEDAD	VALOR	Unidad de medida
Gravedad a 15°C	0,99	g/ml
Gravedad API	11,30	°API
Azufre Total	18578	ppm
Viscosidad a 60°C	3269,7	cP
Viscosidad a 100°C	214,2	cP
Aluminio	2,314	ppm
Calcio	7,095	ppm
Cobre	<0.099	ppm
Hierro	12,32	ppm
Magnesio	0,895	ppm
Sodio	26,92	ppm
Níquel	67,16	ppm
Vanadio	194,1	ppm

**Figura 12.***Curva de destilación para el Crudo Reducido*

**Tabla 6.***Caracterización representativa para las corrientes de Slurry de Orthoflow*

Fecha	7/04/2016	9/05/2019	Unidad
PROPIEDAD	VALOR	VALOR	de medida
Gravedad a 15°C	1,0156	1,0567	g/ml
Gravedad API	7,7	2,27	°API
Carbón Conradson	4,63	4,29	% peso
Azufre Horiba	18578	15800	ppm
Viscosidad a 50°C	152,5693	78,76	cSt
Viscosidad a 100°C	11,2147	8,32	cSt
Punto de Inflamación	123	118	°C
Contenido de cenizas	0,0048	0,043	% peso
Níquel	1,005	0,911	ppm
Vanadio	1,338	1,798	ppm
Silicio	29	53,34	ppm
Hierro	4,29	9,621	ppm
Aluminio	46	41,85	ppm

**Figura 13.***Curva de destilación para el Slurry, a diferentes condiciones de Gravedad API*

Se resalta que la carga regular de la unidad (20100 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 en la torre de vacío con las condiciones de entrada expuestas en la tabla 7.

**Tabla 7.**

*Condiciones de entrada para la simulación*

<b>CONDICIONES DE ENTRADA</b>			
<b>CORRIENTES</b>	<b>Flujo</b>	<b>Presión [psia]</b>	<b>Temperatura [°F]</b>
Crudo Reducido	20100 [BPD]	34,7	676
Slurry 2,2	2500 [BPD]	0,471	640
Slurry 7,7	2500 [BPD]	0,6	640
Vapor de Despojo	2186 [lb/h]	50	850
<b>Parámetros</b>			
Temperatura de Cima		147 [°F]	
Temperatura de Fondo		665 [°F]	
Presión de Vacío		20 [mmHg]	

Con el propósito de la obtención de un asfalto con mejores propiedades, se tienen en cuenta las variables de operación expuestas en la tabla 8 para el análisis de estas en los parámetros de calidad.

**Tabla 8.**

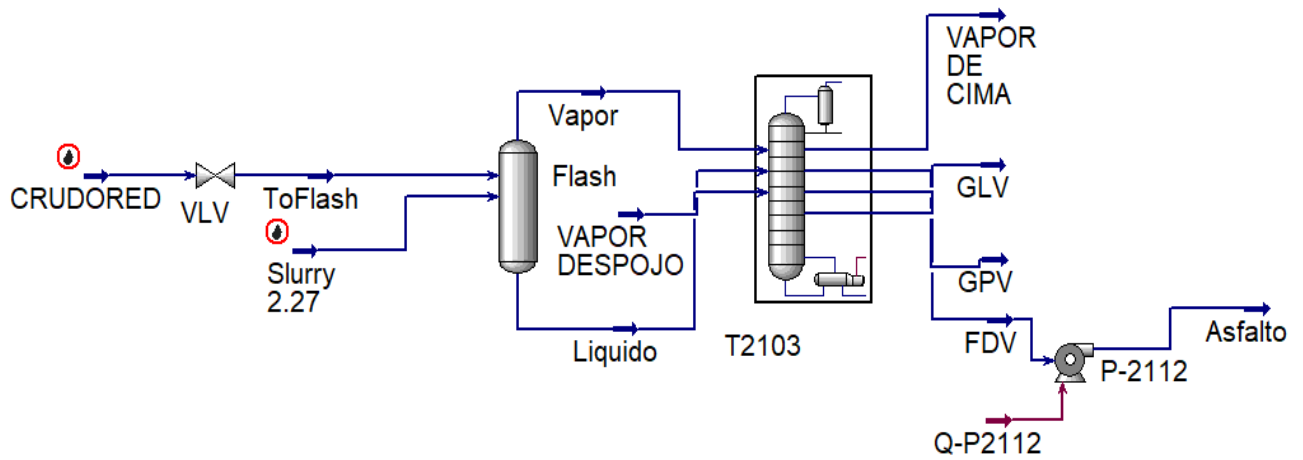
*Variables manipuladas y controladas para el procesamiento del Slurry*

<b>Variables por manipular</b>	<b>Variables por controlar</b>
✓ Flujo vapor de despojo: flujo del sistema original 2863 lb/h hasta 5000 lb/h	✓ Gravedad API de los productos obtenidos (GPV-FDV-GLV)
✓ Flujo de Slurry: Caso base hasta 3000 BPD	✓ Flujo de Fondos y gasóleos
✓ Gravedad API del Slurry : Dos corrientes	✓ IBP y viscosidad de los FDV

En las figuras 14 y 15 se muestra el esquema representado en el software de simulación utilizado.

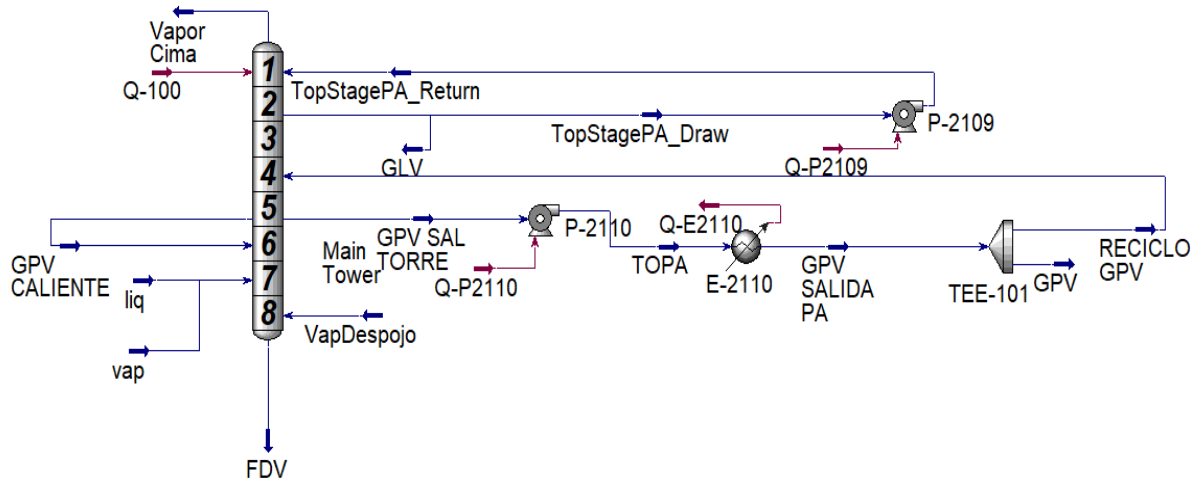
**Figura 14.**

*Configuración del flowsheet utilizada en el Software Aspen Hysys V.10.0*



**Figura 15.**

*Configuración del sub-flowsheet utilizada en el software Aspen Hysys V.10.0*



### ***2.3.5. Análisis de sensibilidad a las variables de operación***

De acuerdo con cada variable anteriormente mencionada, se sintetizan los resultados obtenidos producto del análisis de sensibilidad realizado para cada una de ellas, cumpliendo de esta manera con el alcance de los objetivos señalados en el proyecto. En primer lugar, se destacan dos estados de operación según la variabilidad del API en la corriente de Slurry, el siguiente análisis se enfoca para la corriente de 2,27 °API.

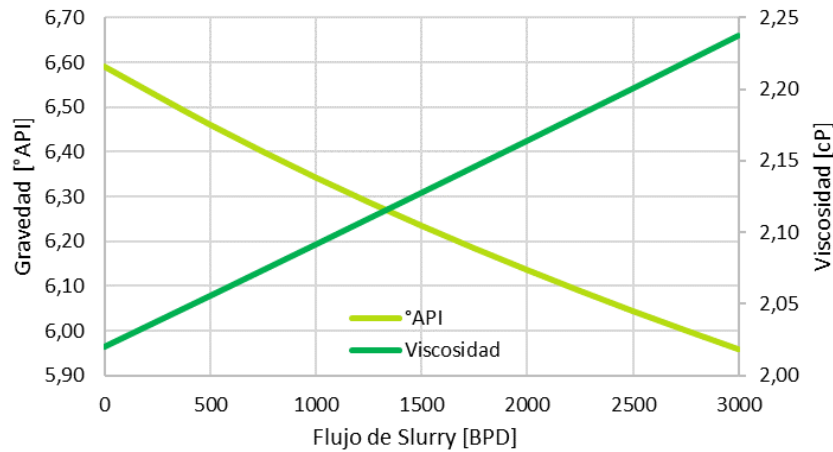
#### **2.3.5.1. Influencia del Flujo de Slurry procesado.**

Al realizar la variación del flujo de Slurry procesado, se inició por el análisis de los fondos de vacío y sus propiedades más destacadas por ser los precursores del asfalto, para observar su influencia en la T-2103 se expone en la figura 16 la tendencia de disminución en la gravedad API, y un aumento de la viscosidad, en función del flujo de Slurry procesado, implicando un asfalto de mejor manejo.

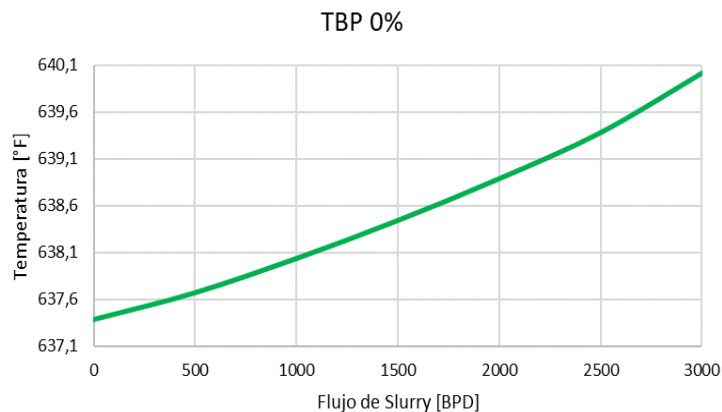
Así mismo según el esquema operacional de la torre se encontró un aumento del IBP de los fondos de vacío como se observa en la figura 17, que se traduce en una menor pérdida de masa del asfalto obtenido, es decir que la destilación al vacío presenta una mejor alternativa para la extracción de fracciones livianas en los residuos pesados, a diferencia del escenario en la preparación de asfalto con fondos DAP donde se presenta una pérdida de masa excesiva por la disminución del IBP.

**Figura 16.**

*Tendencias de los Fondos de vacío en función del flujo de Slurry procesado (Flujo de vapor constante: 2186 lb/h )*

**Figura 17.**

*Tendencia del IBP de los fondos de vacío*

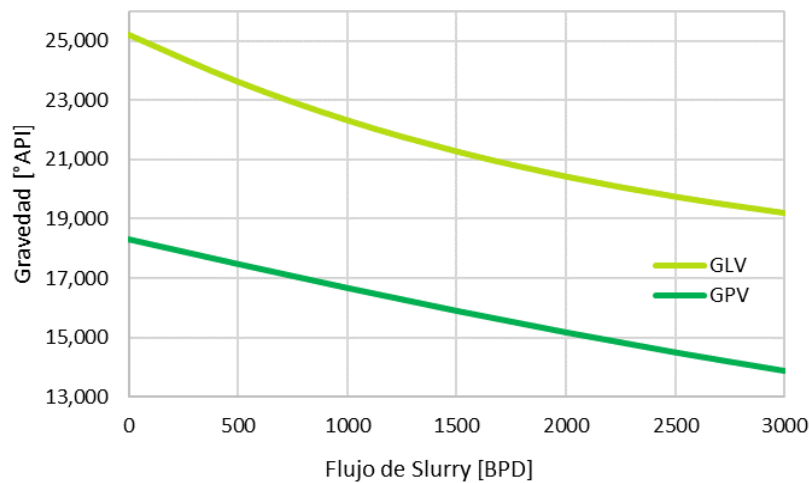


Adicionalmente se propuso un estudio en los otros productos generados de la torre como los gasóleos de vacío, en relación con un aumento en el flujo de Slurry a la entrada y un flujo constante de vapor; (en la figura 18 se puede observar una disminución considerable en la gravedad API de los gasóleos) la corriente de GLV tiene un delta de 6 sin obtener un efecto visible en este producto, mientras que en el GPV posee un delta de variación con valor de 3,8

debido a la naturaleza de los livianos contenidos en el Slurry y que son recuperados en la misma o en la corriente de fondos, cabe aclarar que los productos se encuentran sin ninguna limitación para su direccionamiento hacia las unidades FCC conservando los parámetros de especificación.

**Figura 18.**

*Tendencia de la Gravedad API de los Gasóleos de vacío en función del flujo de Slurry procesado*



**2.3.5.2. Influencia del vapor de despojo.**

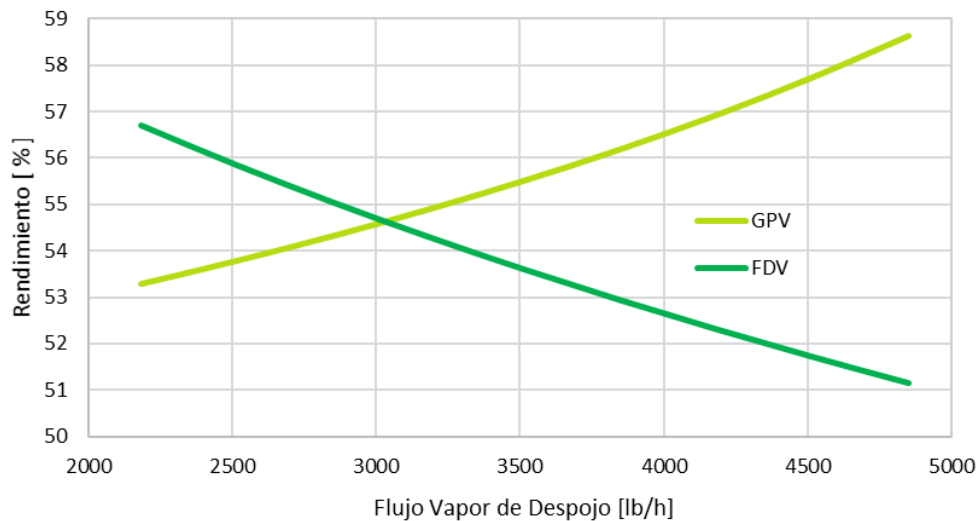
La variación en el flujo de vapor de despojo al fondo de la torre T-2103, se realizó a partir de diversos casos de estudios, donde su alimentación se fijó a partir de la relación entre 6 a 8 [lb/h] de vapor por fondo de vacío producido en [BPD], modificando el flujo de vapor, pero manteniendo el límite para evitar fallas operacionales dentro de la torre, seguidamente se presentan los resultados.

En la figura 19 se analizaron las tendencias de los gasóleos de vacío para lo cual al incrementar el flujo de vapor se obtiene un mayor rendimiento de GPV por la variación en la

carga de crudo – Slurry donde según la composición de esta se orienta a la misma por la extracción de fracciones livianas.

**Figura 19.**

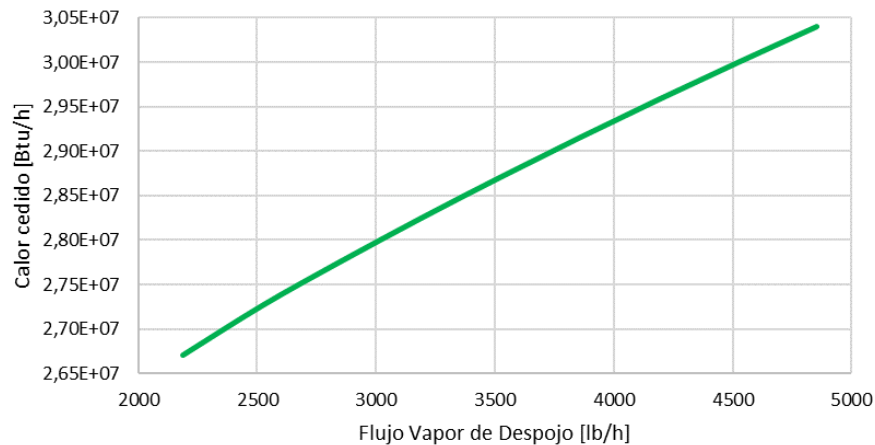
*Tendencias del rendimiento en los Gasóleos de Vacío en función del Flujo de vapor de despojo*



Así mismo y debido al principio de operación de la torre de vacío donde la condensación de los vapores de los fondos pesados implica mantener la temperatura controlada, se hace necesario realizar un análisis demostrado en la figura 20 de la zona de GPV, respecto al aumento de calor transferido requerido por el E-2110 A/B, donde se observa que para la variación de flujos de vapor estudiados, el intercambiador no presenta una limitante para la iniciativa, ya que por sus condiciones típicas de diseño (Máximo intercambio de calor: 32,4 MMBTU/h reportado en la ficha técnica de diseño) el equipo resiste el procesamiento del Slurry sin afectar la operación.

**Figura 20.**

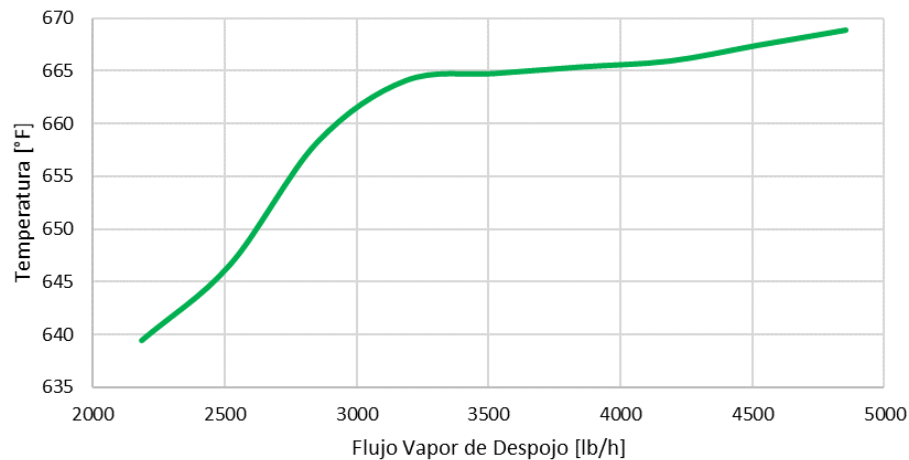
*Calor cedido por el intercambiador de calor E-2110 A/B en función del flujo de vapor de despojo*



Referente a la calidad de los productos obtenidos se debe ajustar el flujo de vapor de despojo al fondo de la torre, ya que un alto flujo incrementa carga a sistemas de condensación en la cima y bajo flujo causa problemas en la sección de vacío debido al exceso de livianos con una alta penetración de los fondos. En ese sentido se observó que la variación de la propiedad API no era significativa según el flujo de vapor utilizado, mientras que su incidencia en el punto inicial de ebullición de los fondos de vacío se aprecia en la figura 21, el cual a partir de un flujo de 3186 lb/h se regula el aumento del IBP manteniendo después un bajo incremento en su temperatura inicial de ebullición alrededor de 4°F

**Figura 21.**

*Temperatura inicial de ebullición para los fondos de vacío en función del flujo de vapor de despojo*



En conclusión, para los gasóleos de vacío los parámetros de API y viscosidad siguen las mismas tendencias, por lo tanto, en el estado de operación con la corriente de 2,27 API y para garantizar un equilibrio entre rendimiento - calidad del GPV sin afectar las condiciones operativas se recomienda un flujo de vapor de 3519 lb/h, lo cual llevará a obtener un rendimiento asociado del 55 % dentro del rango donde el IBP presenta una estabilidad aproximada de 4°F.

### **2.3.5.3. Influencia de la variación en el API del Slurry de carga.**

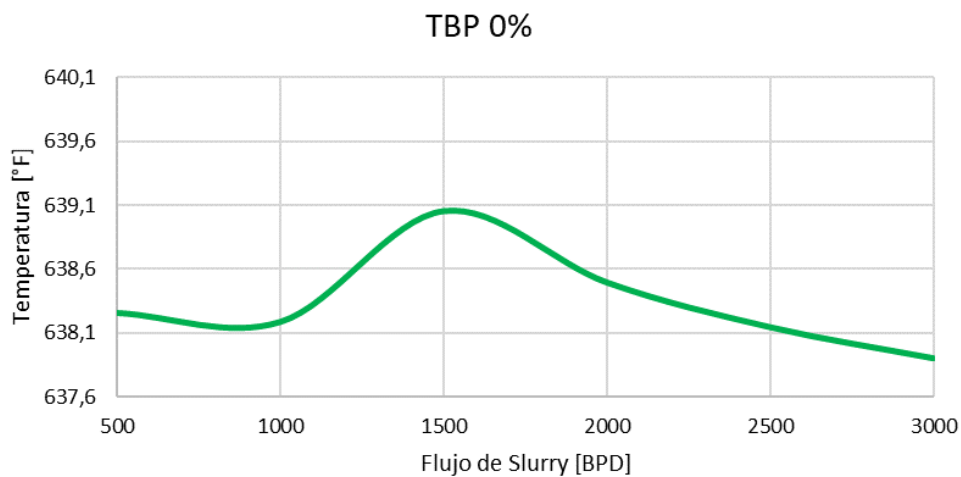
Según los dos estados de operación propuestos con la variación en el API del Slurry de carga, se ejecutó el mismo análisis anteriormente presentado ahora para la corriente con Slurry de 7,7 API, el cual proyectó los mismos resultados en los parámetros analizados.

Sin embargo, se pudo notar en la figura 22 un cambio respecto al IBP de los fondos de vacío con relación a la influencia del flujo de Slurry procesado, debido que a partir de un flujo de 1500 BPD, el punto inicial de ebullición empieza a disminuir hasta obtener un valor igual al

generado con el caso base (637 °F), lo que podría presentar una consecuencia negativa, que afectaría la pérdida de masa en el asfalto, se resalta que esta disminución ofrecería un mejor escenario debido a la presión en la que se mantiene el equipo y la naturaleza de la operación en la torre de destilación al vacío, donde se hace uso del vapor de despojo para incrementar el contacto vapor - líquido y disminuir así la fracción de livianos del Slurry.

**Figura 22.**

*IBP para los fondos de vacío en función del flujo de Slurry (°API de 7,7)*



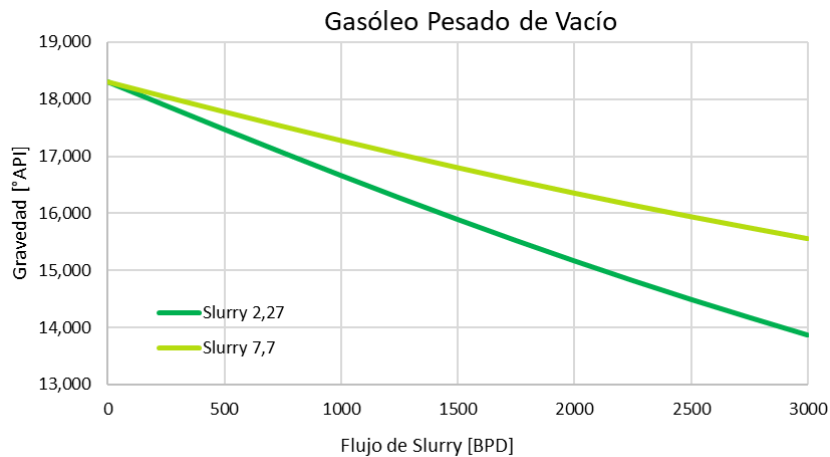
En ese sentido se resalta que con el procesamiento de Slurry con un API de 7,7 se obtienen corrientes con un mayor porcentaje de livianos en su composición, es decir, mejores rendimientos de GPV (60 %), lo que indica que al procesar Slurry con un API mayor se estaría mejorando la calidad del gasóleo de vacío obtenido en la torre, con respecto al gasóleo obtenido al procesar un Slurry de menor API sin comprometer la integridad de la operación.

Al realizar una comparación entre la corriente de Slurry de 2,27 y 7,7 °API, se resalta que para el primer estado de operación se obtenía un rendimiento de 55 % de GPV con un delta de 3,9 °API respecto al caso base; mientras que para el segundo estado de operación se obtenía un

delta de 2,3 en esta propiedad con el mismo rendimiento, concluyendo entonces 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 T-2103; sin embargo se enfatiza que el Slurry a procesar proviene de la unidad de Orthoflow, donde la gravedad API de este subproducto se encuentra entre el rango de [0,7 – 3,1] por lo tanto mientras la operación se encuentre en estado estable las corrientes de Slurry producto serán similares a la corriente de 2,27 API.

**Figura 23.**

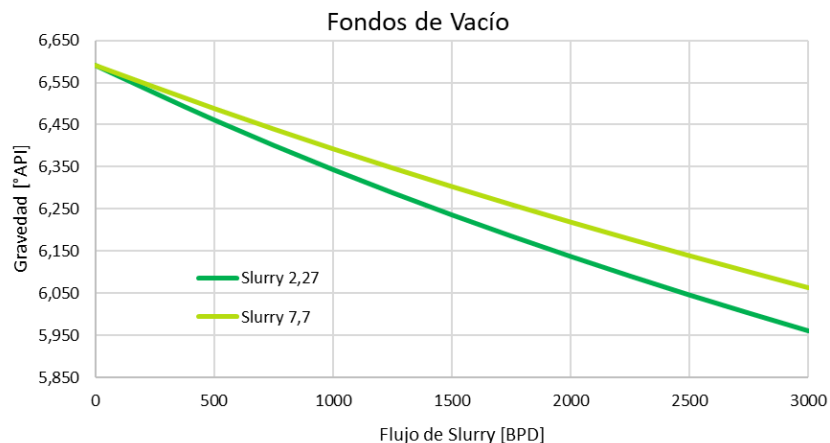
*Influencia de la variación del °API en función del flujo de Slurry procesado para el GPV*



**Figura 24.**

*Influencia de la variación del °API en función del flujo de Slurry procesado para los*

*FDV*



Desde la perspectiva gráfica, en las figuras 23 y 24 se observa una disminución de la gravedad API tanto en los FDV como el GPV según el procesamiento del Slurry en la torre de vacío, en este escenario se puede notar que para el GPV el valor mínimo de gravedad se encuentra entre (13,81 – 15,56) lo que implica que estaría por fuera de especificación para enviarse a las unidades de craqueo catalítico, de esta forma se debe establecer un límite de cargue por la composición del nuevo compuesto y la presencia en contenido de aromáticos del mismo sin que afecte las condiciones de operación en las FCC. Sin embargo, para los FDV en la disminución de la gravedad API se destaca un menor valor en la corriente de 2,27, lo que implica un fondo rico para preparación de asfalto con propiedades fisicoquímicas mejoradas (Vargas y Reyes, 2010).

#### **2.3.5.4. Influencia del Slurry en la composición de los productos obtenidos.**

El asfalto obtenido a partir del procesamiento del Slurry, será un producto con propiedades fisicoquímicas más regulares, ya que debido al análisis SARA del Slurry reportado el 22 de febrero del 2018 por el ICP en la tabla 9, se observa que este compuesto es una mezcla con alto contenido de aromáticos y bajo contenido de asfaltenos y resinas; lo que implica que el asfalto tendrá una modificación en su composición, con un mejor desempeño en cuanto a su comportamiento viscoelástico y reológico por su carácter naftearomático, con mejoras en las propiedades antioxidantes y de envejecimiento otorgadas por el Slurry dentro de las especificaciones de calidad (Puello et al., 2013).

**Tabla 9.***Análisis SARA para el Slurry proveniente de Orthoflow*

<b>ANÁLISIS SARA</b>	<b>(% peso)</b>
SATURADOS	27,82
AROMÁTICOS	68,13
RESINAS+ASFALTENOS	3,91
ASFALTENOS	0,14

Adicionalmente, al ser una corriente de fondos el Slurry presenta una alta concentración de metales pesados como Níquel, Vanadio, Silicio y Aluminio debido a factores como eficiencia en la recuperación o fracturas del catalizador, este compuesto arrastra partículas de dicho catalizador, los cuales pueden ocasionar problemas operativos en la calidad de los gasóleos obtenidos en materia de contenido de aromáticos y carbón conradson.

En relación con los aromáticos son compuestos químicos que en las unidades de cracking catalítico muy difícilmente se fragmentan debido a su naturaleza generando de esta forma alto contenido de estos compuestos en las corrientes producto lo que afectaría las especificaciones de calidad. (Sadeghbeigi, 2000).

Con respecto al carbón conradson modifica el balance de calor en el sistema de regeneración del catalizador debido al incremento en la formación de coque, lo que ocasiona problemas operativos por la dificultad para la remoción del coque adherido y la desactivación del catalizador dificultando su reincorporación al proceso (Pujro et al., 2015).

Se evidencia entonces que según los criterios establecidos se evaluó el aprovechamiento de Slurry en la T-2103, teniendo en cuenta las tendencias obtenidas de las propiedades anteriormente mencionadas en función de la composición de la carga y cómo pueden ser

aplicadas dentro del marco de operación. Se realizó la sintonización del modelo básico de operación de la torre de vacío, por medio de la simulación donde se confirma que el procesamiento de Slurry tiene impacto positivo en la producción de asfalto reflejando mejores propiedades antioxidantes atribuidas a la variación de los FDV y gasóleos por la modificación en la dieta de carga y el aumento en el contenido de aromáticos, de igual forma presenta un panorama negativo por el direccionamiento de aromáticos y metales pesados en la alimentación de las unidades FCC.

Con respecto a lo antes mencionado se decide realizar un ensayo de caracterización en laboratorio, a fin de establecer con certeza las calidades obtenidas de los productos y la influencia del Slurry en los mismos. Por tanto, se evaluaron dos mezclas de 80 %-20 % y 70 %-30 % crudo reducido – Slurry respectivamente, las cuales se sometieron a una destilación en planta piloto con propósito de caracterizar los cortes obtenidos y determinar 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.

### ***2.3.6. Análisis hidráulico del sistema propuesto***

La capacidad de la torre T-2103 corresponde a un valor de 24 KBPD; actualmente se encuentra cargando alrededor de 21,2 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 2100 se encuentra dentro de los valores establecidos por diseño, no se presentan problemas en la operación, sin embargo, se hace necesario una revisión a la bomba de fondos de vacío y de la bomba del circuito de Slurry en la U-500

Orthoflow, por el nuevo cambio requerido en función del proceso. A continuación, se presentan los resultados más relevantes:

- Bomba P-526 A/B en la U-500
- 

El equipo P-526/A de la unidad Orthoflow 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 esta bomba se utilizaría para enviar el Slurry desde la U-500 hacia la U-2100.

En ese mismo sentido se efectuó la verificación del estado de la bomba según condiciones de diseño reportadas en la tabla 10 y se enfatiza que para la alternativa seleccionada no representa una limitante para el sistema, ya que no se hace necesario ningún cambio en la presión de descarga actual del equipo (80 psig), es decir que se mantendría las condiciones actuales del proceso sin superar los límites de diseño.

**Tabla 10.***Condiciones de diseño bomba P-526 A/B*

CONDICIONES DE DISEÑO		
Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura normal	670,00	°F
Temperatura máxima	700,00	°F
Presión operación	80,00	psig
Gravedad específica operación	0,82	N/A
Diferencial de cabeza	255,30	ft
H columna	16,42	ft
H máxima de bomba	288,00	ft
Presión de vapor	26,10	psia
Viscosidad	0,32	cP
Flujo máximo	4663,00	BPD
Flujo máximo	136,00	gpm
Diferencial de presión	90,96	psig
$\Delta P/100$ ft	0,91	psig
Presión succión máxima	34,80	psig
Diferencial de presión a flujo 0	102,61	psig
Presión descarga máxima	137,41	psig

- Bomba P-2112 C/D en la U-2100

El equipo P-2112 C/D de la unidad 2100 es una bomba centrífuga, encargada del envío de los fondos de vacío hacia preparación de asfalto, al implementarse la iniciativa esta bomba tendría un aumento en su flujo y modificación en su estado por el cambio de gravedad api generado por el Slurry, provocando un diferencial de presión aproximado de (257 psig); sin

embargo, no supone ningún riesgo para la integridad de la operación a causa de mantenerse dentro de los límites establecidos por diseño reportados según la tabla 11.

**Tabla 11.**

*Condiciones de diseño bomba P-2112 C/D*

CONDICIONES DE DISEÑO		
Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura de operación	710,00	°F
Presión operación	0,47	psig
Gravedad específica operación	0,85	N/A
Diferencial de cabeza	702,00	Ft
H máxima de bomba	1000,00	Ft
Viscosidad	0,32	cSt
Flujo máximo en BPD	15840,00	BPD
Flujo máximo en GPM	462,00	gpm
Diferencial de presión	257,10	psig
$\Delta P/100$ ft	2,57	psig
Presión succión máxima	30,00	psig
Diferencial de presión a flujo 0	366,23	psig
Presión descarga máxima	396,23	psig

- Definición de adecuaciones y facilidades requeridas

Producto del chequeo hidráulico profundizado en el apéndice B se establece que, 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/A hacia la unidad 2100, incluyendo la modificación del diámetro de 2" a 12" a la boquilla N-16 de cargue.

Adicionalmente, se implementarán las adecuaciones para instalar la válvula asociada al nuevo sistema de control de presión y la platina de orificio para regular el flujo a la entrada de la torre. De igual forma, se requiere la implementación de un calentamiento eléctrico en la totalidad de la línea desde la U-500 hasta la T-2103, para evitar que la temperatura disminuya y se generen taponamientos en el recorrido. En el mismo sentido, se verificó la existencia de facilidades para la inyección de ALC con el fin de limpiar la línea y evitar acumulación de Slurry.

### 3. Conclusiones

Mediante este proyecto se logró validar y presentar a la Refinería de Barrancabermeja la simulación de la destilación al vacío en la torre 2103 de la unidad 2100 en el software Aspen Hysys V10.0, que permite modelar estados típicos de operación y reproduce de forma correcta características como el rendimiento, a partir del análisis de variables en el proceso como flujos y temperaturas, con un margen de error promedio menor al 2,1 % y 4,96 % respectivamente, considerando el modelo como una herramienta significativa para el estudio de nuevas iniciativas y problemas en la operación.

Se encontró que el procesamiento del Slurry corresponde a una iniciativa factible para su implementación en términos económicos con un beneficio proyectado de 15 MUSD/año en la reducción de 2,5 KBPD de combustóleo, impactando así favorablemente el índice de conversión de la GRB.

El API en la corriente de Slurry a procesar corresponde a un parámetro de influencia directa en la calidad de los productos, por ende, el mejor escenario operacional se presenta para una corriente de 2,27 °API con un flujo de vapor de despojo correspondiente a 3519 lb/h, lo cual llevará a obtener un rendimiento asociado del 50 % hacia Gasóleo pesado de vacío y 50 % hacia Fondos de vacío. De igual forma se hace necesario un aumento de  $2,87 \times 10^7$  BTU/h en el retiro lateral de calor, con el propósito de mantener la temperatura controlada por el principio de operación en la torre de vacío.

La destilación al vacío presenta una mejor alternativa para la extracción de fracciones livianas en los residuos pesados, lo que se traduce que los Fondos de vacío tendrán una modificación en su composición con un direccionamiento para producir un asfalto con un mejor

desempeño en cuanto a su comportamiento viscoelástico y reológico con carácter naftearomático y mejoras en las propiedades antioxidantes y de envejecimiento otorgadas por el Slurry.

En el chequeo hidráulico se verificó la viabilidad de la alternativa propuesta con la disponibilidad en las condiciones de diseño y capacidad para los equipos involucrados. De igual forma se definen a continuación, los requerimientos de ingeniería:

-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/A hacia la unidad 2100. Adicionalmente, se implementará las adecuaciones para instalar una platina de orificio con diámetro de 1,66 in para tratar un máximo flujo de 3000 BPD.

-Así mismo se hace necesario la modificación del diámetro de 2" a 12" a la boquilla N-16 de cargue, realizando la instalación de expansiones sucesivas desde 3" hasta la brida de entrada a la torre.

-Se efectuó la verificación del estado de las bombas P-526/A y P2112 C/D las cuales no representan limitantes para la iniciativa, ya que se encuentran dentro de sus condiciones de diseño específicas.

-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-2103.

-Del mismo modo para obtener un cargue exitoso se destaca la necesidad de un sistema de control de presión, donde se adquiera 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, siendo ubicada lo más cercano posible a la torre para prevenir caídas de presión excesivas que generen una vaporización no deseada en la línea de transferencia.

-Además, se requiere la implementación de un calentamiento eléctrico en la totalidad de la línea desde la U-500 hasta la T-2103, para evitar que la temperatura disminuya y genere 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 la línea y evitar acumulación de Slurry que ocasione taponamientos durante el mantenimiento de las unidades involucradas.

#### **4. Recomendaciones**

Debido al proceso de craqueo catalítico fluidizado, el Slurry contiene una cantidad significativa de sólidos suspendidos provenientes de la ruptura del catalizador, los cuales representan un factor de riesgo debido a posibles problemas erosionales o de ensuciamiento en equipos que no están diseñados para su carga. Por esta razón, se enmarca la necesidad de profundizar en la evaluación de sistemas de separación de partículas sólidas, en vista de garantizar confiabilidad en la operación.

En relación de establecer con certeza las calidades obtenidas de los productos y la influencia del Slurry en los mismos se recomienda priorizar los resultados de los análisis de caracterización del laboratorio y 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 del procesamiento de Slurry.

### Referencias Bibliográficas

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

Ecopetrol Oficial. (2020, 18 septiembre). *Recorrido virtual por la Refinería de Barrancabermeja Ecopetrol*. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=2GYtPdo\\_kE&t=190s](https://www.youtube.com/watch?v=2GYtPdo_kE&t=190s)

Ecopetrol S.A. (2020). *Fundamentos de Proceso y Logística de la GRB*. SharePoint. [https://www.ecopetrol.com.co/documentos/coordinaciondeingenieriadeprocesos/Visiongeneral%204T19%20VF %20ESPA%c3%91OL.pdf](https://www.ecopetrol.com.co/documentos/coordinaciondeingenieriadeprocesos/Visiongeneral%204T19%20VF%20ESPA%c3%91OL.pdf).

Ecopetrol S.A. (2008). *Descripción general del proceso U-2100, de Manual de descripción de procesos de la unidad de Crudos U-2100*, Barrancabermeja.

Ecopetrol S.A. (2020). *Hoja de especificación de la torre de vacío T-2103 – Unidad 2100*. Barrancabermeja.

Ecopetrol S.A. (2008). *Descripción general del proceso U-500, de Manual de descripción de procesos de la unidad de craqueo catalítico Orthoflow (FCC/VRU)*, Barrancabermeja.

Ecopetrol S.A. (2008). *Descripción general del proceso U-1000, de Manual de descripción de procesos de la unidad de desasfaltado con propano*, Barrancabermeja.

Ecopetrol S.A. (2008). *Descripción general del proceso U-2500,» de Manual de descripción de procesos de la unidad de Demex*, Barrancabermeja.

García Londoño, C., Ecopetrol Oficial. (2020). *Ritual de Gestión I semestre 2020 Refinería de Barrancabermeja Ecopetrol*. SharePoint.

<https://ecopetrol.sharepoint.com/sites/grb/Presentaciones/20190729%20Ritual%20II%20v3.pdf?csf=1&e=Iixvab&cid=d64bc19f-9784-4685-99cd-fe08cbf504d6>

Organización Marítima Internacional. (2019). *Azufre 2020: reduciendo las emisiones de óxidos de azufre* <https://www.imo.org/es/MediaCentre/HotTopics/Paginas/Sulphur-2020.aspx>

Portal Ecopetrol S.A. (2014). *Nuestra historia*.

<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/NuestraEmpresa/QuienesSomos/NuestraHistoria#:~:text=Actualmente%2C%20Ecopetrol%20S.A.%20es%20la,las%20cuatro%20principales%20de%20Latinoam%C3%A9rica.>

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

<http://materias.fi.uba.ar/7605/Archivos/Refineria.pdf>

Puello, J., Afanasjeva, N., and Álvarez, M. *Correlaciones estadísticas para la estimación de propiedades reológicas de asfaltos en estado original y envejecido*, Revista ION, Bucaramanga, (2013).

Pujro, R., Falco, M., and Sedran, U. *Catalytic cracking of heavy aromatics and polycyclic aromatic hydrocarbons over fluidized catalytic cracking catalysts*, Energy and Fuels, vol. 29, no. 3, pp. 1543–1549, 2015, doi: 10.1021/ef502707w. (2015).

Ruiz, L., Vega, J., Martínez, J. and E. Erdmann, *Diseño del proceso de destilación al vacío*,” Cons. Nac. Investig. Científicas y Técnicas, vol. 7, 2013.

Sadeghbeigi, R., *Fluid Catalytic Cracking Handbook: Design, operation and troubleshooting of FCC facilities*, 2nd ed. Gulf professional publisher. (2000).

Trambouze, P. (2000). *Petroleum Refining V.4: Materials and Equipment*. Editions Technips.

Vargas, X, and Reyes, F. (2010). *El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos*. Ingeniería e Investigación, 30(3), 27-44.

## Apéndices

### Apéndice A Análisis de Factibilidad para el Control de Cambios en la Planta

Objetivo del requerimiento: Reducir a 20 KBPD la producción de combustóleo en la refinería, esta disminución se establece por el procesamiento del Slurry destinado para la preparación del combustible, como consecuencia del cargue parcial de Slurry proveniente de Orthoflow en la torre de vacío T-2103.

Beneficios esperados: Con la implementación de la iniciativa propuesta se espera un incremento del ICR el cual se determina por la ecuación 1, debido a la obtención de gasóleos con mayor valor agregado.

$$\% ICR = \frac{\text{Crudo de carga} - \text{Producción de fuel oil}}{\text{Crudo de carga}} \times 100 \% \quad \text{Ecuación 1}$$

Considerando el procesamiento de 2,5 KBPD de Slurry y contemplando un rendimiento 50 %-50 % de gasóleos-fondos de vacío, el beneficio económico proyectado será de 15 MUSD/año, el cual se calculó a partir de la ecuación 2.

-Diferencial del asfalto nacional vs. fuel oil = 21 USD/barril

- Diferencial de gasóleo vs. fuel oil = 12 USD/barril

$$\text{Beneficio} = \left( 21 \frac{\text{USD}}{\text{barril}} \times 1250 \frac{\text{barril}}{\text{día}} \right) + \left( 12 \frac{\text{USD}}{\text{barril}} \times 1250 \frac{\text{barril}}{\text{día}} \right) = 40 \frac{\text{K USD}}{\text{día}} \quad \text{Ecuación 2}$$

#### Estimación de costos

En la tabla 12 se presentan los principales requerimientos económicos para la puesta en marcha de la iniciativa.

**Tabla 12.**

Presupuesto para la implementación del procesamiento de Slurry en la T-2103

DESCRIPCIÓN	COSTO [USD]
Materiales	70.000
Montaje	35.000
Ingenierías y estudios	10.000
<i>TOTAL</i>	115.000

*Nota: Adaptado de Análisis de factibilidad para administración de cambios en nuevos activos industriales-Ecopetrol S.A.*

### **Apéndice B Chequeo hidráulico para el circuito de envío de Slurry desde el fondo de T-501 hasta la T-2103**

A continuación, se presentan los cálculos realizados para determinar las condiciones de flujo, pérdidas de presión y velocidad de la alternativa considerada para enviar el Slurry desde la U-500 hacia la U-2100.

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

En términos generales se aplicarán los parámetros 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 (ECP-VIN-P-PRO-MT- 001).

Se utilizó el software INPLANT 4.5, para realizar los cálculos hidráulicos los cuales simulan la red del circuito a evaluar y el programa INSTRU CALC 5 para el dimensionamiento de los elementos de control requeridos en el sistema planteado.

#### Análisis de resultados

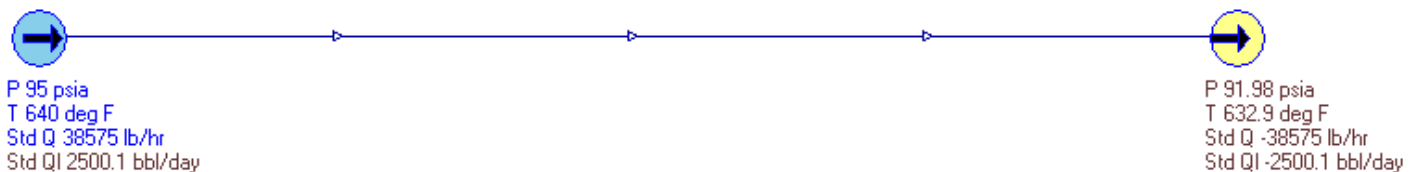
La torre 2103 se encuentra a una presión reducida (20 mmHg), por ende, debido al riesgo de erosión en la línea de transferencia por altas velocidades y presencia de sólidos suspendidos en el Slurry, se decide realizar el cargue de forma independiente por una boquilla ya existente modificando su diámetro de 2" a 12" ubicada estratégicamente entre la zona flash y la inyección de vapor de despojo de la torre.

En este sentido, para el envío de un flujo de 2,5 KBPD de Slurry se destaca en la línea un diferencial de presión elevado, obtenido por el análisis en la presión de descarga de la bomba P-526/A correspondiente a un valor de 95 psia y la presión en la zona de vaporización instantánea de la torre de vacío con valor de 0.4 psia, por lo tanto, se puede inferir la necesidad de implementar un nuevo sistema de control que garantice la condición óptima de ingreso en la torre.

En virtud de comprobar lo anterior se procede a simular en Inplant la ruta hipotética del circuito de tubería con su longitud y número de codos aproximados mostrado en la figura 25, desde la P-526/A succionando de la T-501 hasta la boquilla N-16 de la U-2100, enfatizando que esta simulación se basa en medidas aproximadas, lo que indica que para mayor precisión se debe tener una mayor rigurosidad con una inspección visual donde se realice el seguimiento a través de bancos de tuberías cercanos a los equipos y las dos plantas involucradas. En primera instancia se confirma que la máxima caída de presión generada por la línea es de 3,02 psia, indicando así que para realizar el cargue de forma exitosa se hace necesario un sistema de control de presión en la línea de Slurry y un medidor que regule el flujo de esta corriente proveniente de la U-500 con propósito de alcanzar la presión requerida en la zona flash de la torre.

### Figura 25.

*Circuito de cargue Slurry desde la P-526 hasta la T-2103*



De acuerdo con los resultados de la simulación hidráulica presentados en la tabla 13, no se observa restricción alguna en los parámetros de la tubería, ya que sus valores se encuentran dentro del rango recomendado para evitar deposición de partículas sólidas en las tuberías y cumplen los criterios de dimensionamiento para las líneas del manual técnico.

**Tabla 13.**

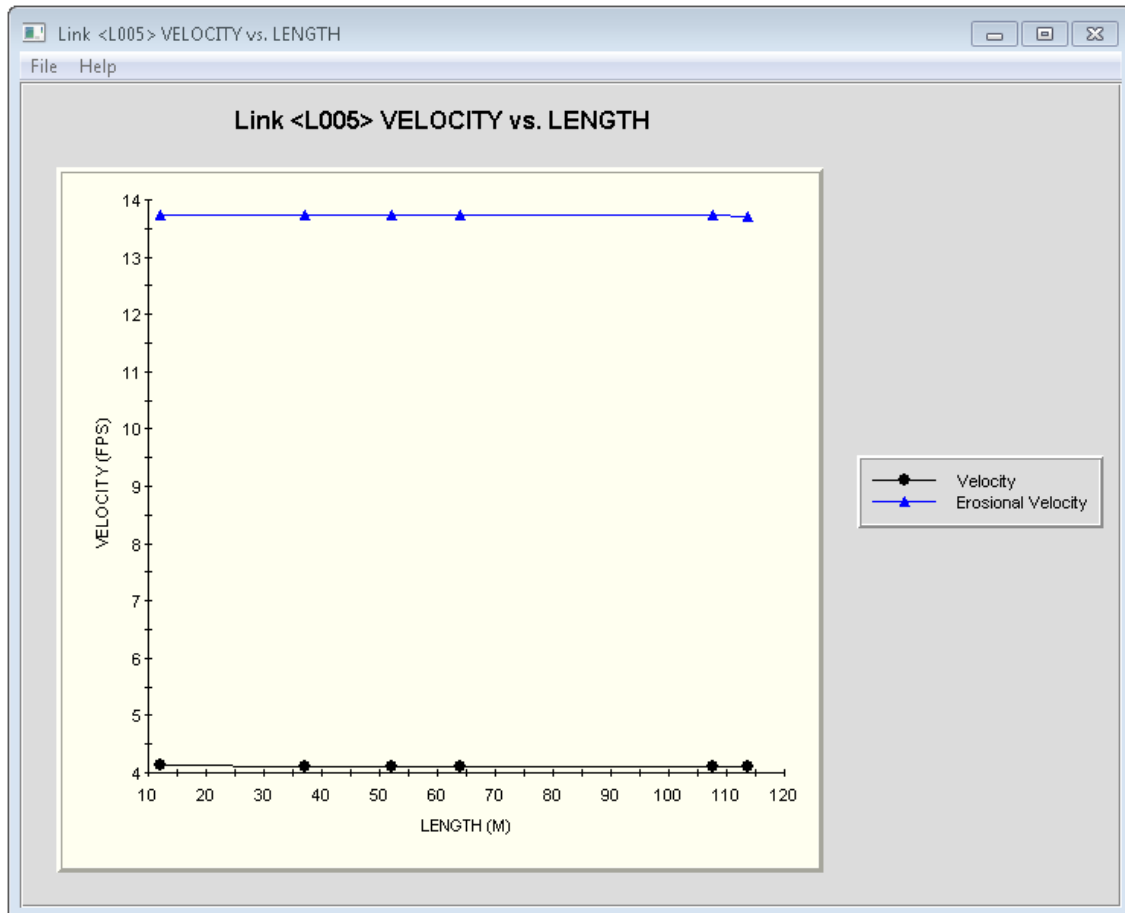
*Resultados circuito de cargue Slurry desde la P-526 hasta la T-2103*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Valor</b>
Caudal	bpd	2500
Longitud	ft	372,6
Diámetro nominal	in	3
N Reynolds	-	245540
f	-	0,019
$\Delta P/100$	psi/100ft	0,81
$\Delta P$ Total	psia	3,02
Velocidad	ft/s	4,11
<b><i><math>\Delta P</math> total por tubería = 3,02 psia</i></b>		

Por otro lado, para realizar el cargue de Slurry de la manera descrita, la velocidad del fluido constituye un parámetro clave debido a la presencia de sólidos suspendidos que al presentar altas velocidades incrementan el riesgo de erosión en las líneas. En consecuencia, se analiza en la figura 27 el perfil de velocidad obtenido para la línea a través de toda su longitud, el cual ratifica que la velocidad del fluido correspondiente a un valor de 4,11 ft/s no supera la velocidad de erosión asociada a 13,72 ft/s prediciendo de alguna forma que no supone riesgo para la operación.

**Figura 26.**

*Perfil de velocidad de la línea de 3''*



En función de lo anterior se procedió a realizar el dimensionamiento de los elementos requeridos que se ajustarán a las condiciones del sistema, por medio del programa Instru Cal 5 junto con las propiedades fisicoquímicas de la sustancia.

Conforme a los datos arrojados por el software el primer instrumento corresponde a una válvula de control cuyas especificaciones son presentadas en la figura 28, en la cual dependiendo de sus condiciones se observa que la válvula requerida es de 2'' con un Cv de 25. Adicionalmente, se necesita de un diseño que contemple cavitación incipiente para evitar daños

que afecten la integridad de este nuevo elemento con un rango amplio de operación y un sistema de cierre en falla, debido a que de esta forma se estaría protegiendo la operación en la T-2103.

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 de transferencia.

**Figura 27.**

*Dimensionamiento de la válvula de control requerida*

Control Valve - Liquid flow

File Units Fluid properties Valve data Options Base cond Help

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	Lin Cavitation	
Inlet pressure	psig	80	80	80	Flow To	Ports	
Valve pressure drop	psi	75.61	76.88	79.76	Close	One	
SG @ flow conditions		0.823	0.823	0.823	Size	in Cv	
Viscosity @ FTP	cp	0.316	0.316	0.316	2	25	
Vapor pressure	psia	26	26	26	FL	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
Output data					3	3	.216
Percent of valve Cv		40	33	7	Calculation options		
Cavitation index		.90901	.89399	.86171	<input checked="" type="radio"/> Valve size <input type="radio"/> Flowrate <input type="radio"/> Pressure drop		
Noise level	dba	0	0	0	By		
Sizing pressure drop	psi	63.634	64.93	66.238	Date		
Flow status		Flashing	Flashing	Flashing	9230		

Con respecto al segundo instrumento se relaciona una platina de orificio que cumpla con los parámetros de dimensionamiento obtenidos en la figura 29, donde se determina que debe tener un diámetro de orificio de 1,66547 in para el manejo de un flujo máximo de 3000 BPD.

**Figura 28.**

*Dimensionamiento de la platina de orificio requerida*

The screenshot displays the AGA Orifice Plate software interface for a liquid flow calculation. The window title is "AGA Orifice Plate - Concentric - Flange Taps - Liquid Flow". The interface is divided into several sections:

- Input data:** A table of input parameters for a slurry flow.
 

Parameter	Value
Tag	Platina de orificio
Fluid	Slurry
Max flow @ 60F	3000 bbl/d
Norm flow @ 60F	2500 bbl/d
Flow temperature	640 degF
Inlet pressure	80 psig
Max flow differential	100 inH2O
SG @ flow conditions	.8307
SG @ base conditions	1.06
Viscosity @ FTP	.4185 cp
Meter tube ID @ 68F	3 in
Vent/drain hole dia	.09375 in
Orifice dia @ 68degF	1.66547 in
Element material	304 stainless steel
Meter tube material	Carbon steel
- Output data:** A table of calculated output parameters.
 

Beta ratio @ flow temp	.556044
Norm flow differ inH2O	69.44
Norm. flow Reynolds No.	193755
Max pressure loss inH2O	67.83
Max power loss hp	.1599
Uncertainty percent	.5894
Min plate thickness in	.125
- Calculation factors @ normal flow:**

Plate thermal expansion	1.00543
Velocity of approach	1.05152
Discharge coefficient	.60731
- Calculation options:**
  - Vent hole
  - Drain hole
  - Standard size
  - Custom size
  - Orifice size
  - Flowrate
  - Differential range

A "Calculate" button is located at the bottom center of the interface.