

Ingeniería conceptual para la implementación de un sistema de separación de sólidos en slurry producto de la U-500 de craqueo catalítico en la refinería de Barrancabermeja

Mónica Sánchez Calderón

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Química

Director

Crisóstomo Barajas Ferreira

Ingeniero químico, Msc.

Codirector

Neyla Marithza Brochero Conde

Ingeniera Integral de Procesos A, Ingeniera Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2021

### **Dedicatoria**

A mis padres, Verónica Calderón y Arturo Sánchez por su apoyo incondicional en este proceso, por su paciencia y su sacrificio para lograr mis metas. Gracias por siempre desear lo mejor para mí y por soñar siempre a mi lado.

### **Agradecimientos**

A Dios por darme la salud, la vida y las capacidades necesarias para lograr esta gran meta.

A Jesús Gómez por apoyarme en la culminación de mis estudios de pregrado y en el desarrollo de mi práctica empresarial, gracias por la ayuda incondicional, por soñar y construir un futuro a mi lado.

A mis amigos María Paula, Adriana, Laura, Sebastián, Diana y Drailyn que estuvieron conmigo en este proceso, por tantas luchas y momentos alegres que compartimos juntos, por el aprendizaje que construimos y por hacer mi paso por la universidad más agradable.

Al personal de la Refinería de Barrancabermeja que confió en mí y me ayudo a crecer tanto personal como profesionalmente, especialmente agradezco a la ingeniera Neyla Brochero por sus consejos y sus enseñanzas que me permitieron aprovechar esa práctica empresarial al máximo. Igualmente agradezco al Ingeniero Eder Baquero por guiarme y darme las herramientas para la elaboración de este proyecto, gracias por su paciencia y dedicación. Además, agradezco al ingeniero Christian Angulo Beleño por los conocimientos compartidos y por dedicar su tiempo en mi aprendizaje.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarme el conocimiento y las aptitudes que aportaron valiosos aprendizajes en mi vida, gracias por acogerme por tantos años. Al profesor Crisóstomo Barajas por su tiempo, dedicación, conocimiento y valiosos aportes en la elaboración de este proyecto de grado.

A todas las personas en general que aportaron en mi vida para llegar hasta este momento, gracias.

## 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.....	16
2.1 Evaluación de las tecnologías ofrecidas en el mercado para separación de sólidos .....	16
2.1.1 Esquema y condiciones actuales del circuito de slurry.....	16
2.1.2 Revisión de los sistemas de separación de sólidos .....	16
2.1.3 Selección de la alternativa .....	16
2.2 Revisión de variaciones operacionales para instalación de hidrociclones.....	17
2.2.1 Especificaciones hidrociclón .....	17
2.2.2 Esquema de cambios propuestos .....	17
2.2.3 Análisis caldera B-520.....	17
2.3 Determinación de cálculos de diseño preliminares y estudio de hidráulica de los hidrociclones.....	17
2.3.1 Cálculo de las dimensiones de los hidrociclones.....	17
2.3.2 Análisis bomba P-526/A .....	18
2.3.3 Hidráulica tuberías que conectan a los hidrociclones .....	18
3. Resultados .....	19
3.1 Evaluación de las tecnologías ofrecidas en el mercado para separación de sólidos.....	19

3.1.1 Esquema y condiciones actuales del circuito de slurry.....	19
3.1.2 Revisión de los sistemas de separación de sólidos .....	21
3.1.3 Selección de alternativa .....	25
3.2 Revisión de variaciones operacionales para instalación de hidrociclones.....	26
3.2.1 Especificaciones hidrociclón .....	26
3.2.2 Esquema de cambios propuestos.....	29
3.2.3 Análisis caldera B-520.....	30
3.3 Determinación de cálculos de diseño preliminares y estudio de hidráulica de los hidrociclones	32
3.3.1 Cálculo de las dimensiones de los hidrociclones.....	32
3.3.2 Análisis bomba P-526/A .....	34
3.3.3 Hidráulica tuberías que conectan a los hidrociclones .....	36
4. Conclusiones.....	39
5. Recomendaciones .....	40
Referencias bibliográficas.....	41
Apéndices.....	42

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Condiciones de operación de slurry descarga P-526/A .....	20
Tabla 2. Distribución de tamaño de partícula .....	20
Tabla 3. Calor requerido para calentar slurry .....	22
Tabla 4. Cálculo de calor del horno .....	23
Tabla 5. Costos energéticos del gas combustible.....	23
Tabla 6. Perfil de temperatura de la torre T-501.....	30
Tabla 7. Valores diseño hidrociclón .....	34
Tabla 8. Condiciones de operación circuito slurry .....	34
Tabla 9. Datos P-526/A.....	35

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Metodología empleada para realizar ingeniería conceptual para implementación de un sistema de separación de sólidos en la corriente de slurry.....	18
Figura 2. Circuito actual del slurry .....	19
Figura 3. Flujo de fluido en hidrociclones. Trawinski, Helmut (2010) .....	25
Figura 4. Matriz aspectos deseables (AD) .....	26
Figura 5. Esquema de cambios circuito de slurry .....	29
Figura 6. Cambio en la temperatura de salida de slurry.....	31
Figura 7. Variación en el calor intercambiado .....	31
Figura 8. Influencia del flujo BFW (agua de calderas) en la temperatura de salida de slurry .....	31
Figura 9. Influencia del flujo BFW (agua de calderas) en el calor intercambiado .....	31
Figura 10. Variables de diseño de un hidrociclón.....	33

**Lista de Apéndices**

	Pág.
Apéndice A. Procedimiento análisis caldera B-520 .....	42
Apéndice B. Procedimiento análisis hidráulico.....	47

### Abreviaciones

ALC	Aceite Liviano de Ciclo
APC	Aceite Pesado de Ciclo
B	Nomenclatura para calderas
BPD	Barriles Por Día
COR	Centro de Optimización de la Refinería
DAP	Unidad de Desasfaltado con Propano
DCS	Sistema de Control Distribuido
FCC	Craqueo Catalítico fluidizado ( <i>Fluid Catalytic Cracking</i> , por sus siglas en inglés).
GLP	Gas Licuado del Petróleo
GRB	Gerencia Refinería Barrancabermeja
H	Nomenclatura para hornos
OMI	Organización Marítima Internacional
P	Nomenclatura para bombas
PGR	Propileno Grado Refinería
PI	Información de Planta ( <i>Plant Information</i> , por sus siglas en inglés)
T	Nomenclatura para torres
U	Nomenclatura para unidad de planta

### Resumen

**Título:** Ingeniería conceptual para la implementación de un sistema de separación de sólidos en slurry producto de la U-500 de craqueo catalítico en la refinería de Barrancabermeja \*

**Autor:** Mónica Sánchez Calderón \*\*

**Palabras Clave:** Hidrociclones, slurry, azufrados, asfalto mejorado.

**Descripción:** La sección de Cracking Catalítico Orthoflow de la Refinería de Barrancabermeja procesa gasóleos para producir Gas Licuado del Petróleo (GLP), nafta y productos adicionales como el slurry, este último utilizado para producción de combustóleo [3]. El slurry generalmente arrastra gran cantidad de compuestos que representan problemas tanto de corrosión en los equipos como de reducción de calidad del combustóleo al ser comercializado, es por esto que se planteó enviar el slurry de la U-500 de Cracking Catalítico a la Torre de Vacío T-205 en la Unidad de Refinación de Crudos para producción de asfalto mejorado. El fin de este trabajo se centra en la elaboración de la ingeniería conceptual para la implementación de un sistema de separación de sólidos para el slurry que contenga la selección de la alternativa que cumpla con los objetivos del proyecto. Para esto se evaluaron 4 tecnologías y se estableció que instalar hidrociclones en el fondo de la torre fraccionadora T-501 después de las bombas P-526/A y antes del tren de enfriamiento aseguran una operación confiable dentro de las ventanas de integridad, una disposición segura de los sólidos recirculándolos al sistema de reacción garantizando el tratamiento de la totalidad del slurry, cumpliendo así con las especificaciones requeridas para alcanzar el objetivo de este proyecto.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Crisóstomo Barajas Ferreira, Msc. Codirector: Neyla Marithza Brochero Conde, Ingeniera Integral de Procesos A, Ingeniera Química.

### Abstract

**Title:** Conceptual engineering for the implementation of a solids separation system in slurry as a product of the catalytic cracker U-500 at the Barrancabermeja refinery\*

**Author:** Mónica Sánchez Calderón<sup>1</sup>

**Key Words:** Hydrocyclones, slurry, sulfur, improved asphalt.

**Description:** The Orthoflow Catalytic Cracking section of the Barrancabermeja Refinery processes diesel to produce Liquefied Petroleum Gas (LPG), naphtha and additional products such as slurry, the latter used for fuel oil production [3]. The slurry generally carries a large number of compounds that represent problems both of corrosion in the equipment and of reduction of quality of the fuel oil when it is commercialized, that is why it was proposed to send the slurry of the U-500 Catalytic Cracking to the Vacuum Tower T-205 in the Crude Oil Refining Unit for the production of improved asphalt. The purpose of this work is focused on the elaboration of the conceptual engineering for the implementation of a solids separation system for the slurry that contains the selection of the alternative that meets the project objectives. For this, 4 technologies were evaluated and it was established that installing hydrocyclones in the bottom of the fractionating tower T-501 after the P-526 / A pumps and before the cooling train ensures a reliable operation within the integrity windows, an arrangement safe of the solids recirculating them to the reaction system guaranteeing the treatment of the totality of the slurry, complying with the specifications required to achieve the objective of this project.

---

\* Degree Work

<sup>1</sup> Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Advisor: Crisóstomo Barajas Ferreira, PhD. Co-Advisor: Neyla Marithza Brochero Conde, Integral Process Engineer A, Chemical Engineer.

### **Introducción**

El actual porcentaje de azufre en el combustóleo producido genera pérdidas al margen de ganancias de la refinería, ya que sobrepasa el límite fijado por la OMI el 1 de Enero del 2020 que es de 0,5% peso/peso [4] y el límite máximo que es de 1,8% peso/peso, además, provoca deterioro acelerado de los equipos que intervienen en este proceso de producción. Para analizar esta problemática es necesario de mencionar sus causas, una de ella es el arrastre de finos de catalizador y material particulado en el slurry utilizado para su producción, es por esta razón que se presentó una alternativa para mejorar dicha situación en la cual el slurry de la Unidad de Cracking Catalítico Orthoflow sea redireccionado a la Unidad de refinación de Crudos para ser cargado en la Torre de Vacío T-205 para producción de asfalto mejorado.

La Refinería de Barrancabermeja perteneciente a Ecopetrol S.A. cuenta con más de 50 plantas: unidades de proceso, tratamiento, servicios y control ambiental. Está conformada por cinco Unidades Topping, cuatro Unidades de Ruptura Catalítica, dos plantas de Alquilación, Ácido Sulfúrico, Parafinas, y Aromáticos. El complejo industrial elabora productos crudos de varias calidades para producir diferentes tipos de productos requeridos por el mercado nacional. El área de refinación produce principalmente gasolinas y destilados, el área de petroquímica elabora productos petroquímicos tales como bases lubricantes, parafinas, aromáticos y polietilenos, en el área de cracking se cargan gasóleos principalmente para producir GLP y nafta por medio del rompimiento de moléculas de hidrocarburos grandes, los productos terminados y el recibo de crudos se realizan en el área de Materias Primas y los servicios industriales son generados en la Refinería con recurso propio.

Las Unidades de Craqueo Catalítico consisten en el proceso de ruptura catalítica para descomponer las moléculas más pesadas de hidrocarburos y así obtener productos más livianos [1]. El Craqueo Catalítico Fluido (FCC, por sus siglas en inglés) es un proceso que emplea un catalizador en forma de partículas esféricas muy pequeñas, llamado catalizador zeolítico, el cual se comporta como un fluido cuando está aireado con vapor o aire. El catalizador fluidizado es continuamente circulado desde la zona de reacción donde ocurre la reacción del craqueo a la zona de generación, donde el catalizador es reactivado. La acción del catalizador produce también el vehículo para transferir calor desde el regenerador a la zona de reacción. Estas dos zonas están localizadas en vasijas separadas llamadas regenerador y reactor, respectivamente [3]. La Unidad de Cracking Orthoflow diseñada por M.W Kellogg (actual KBR) recibe como carga diferentes corrientes que se mezclan en la entrada de la planta para lograr una carga homogénea, continua, sin agua y con temperatura adecuada para el proceso. La carga es procesada con la finalidad de generar productos de mayor valor tales como: ALC, GLP, gasolina, PGR y slurry.

El slurry es un aceite aromático pesado que se genera en el fondo de las torres fraccionadoras de las Unidades de Craqueo Catalítico. En 2019, la U-500 produjo alrededor de 2500 BPD de slurry, y en promedio, un 40% fue enviado hacia la U-1000 DAP (Unidad de Desasfaltado con Propano), mientras que el balance fue empleado en la preparación de combustóleo. Este combustóleo actualmente contiene 3,5% peso/peso de azufre.

El presente proyecto consiste en la elaboración de la ingeniería conceptual que contenga los cálculos de diseño, adecuaciones y facilidades para implementar un sistema de separación de partículas sólidas que garantice el tratamiento de la totalidad del slurry producto de Cracking

Orthoflow, la disposición de sólidos con el mínimo contacto de personal de mantenimiento y menor impacto ambiental, alta eficiencia en la separación de sólidos que permita valorizar la corriente de slurry asegurando la confiabilidad de los equipos y el cumplimiento de ventanas operativas para el control normal de la operación, esto con el fin de reducir el contenido de cenizas en el slurry para tratamiento y posterior comercialización como producto de mayor valorización. Por lo cual se plantea: ¿Cuál será la ubicación y la tecnología óptima que permita una operación flexible para lograr la máxima separación de sólidos en el slurry?

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar la implementación de un sistema de separación de sólidos para el slurry producto de la Unidad de Craqueo Catalítico Orthoflow en la Refinería de Barrancabermeja para cumplimiento de requerimientos ambientales y operacionales que permita presentar la mejor alternativa para tratamiento del slurry a través del desarrollo de la ingeniería conceptual del proceso.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Evaluar las alternativas de las tecnologías existentes en el mercado para separar material particulado que permita una elección acorde a las necesidades de Ecopetrol y que cumpla con el alcance del proyecto.

Analizar las variaciones operacionales referentes a la instalación de un sistema de separación de sólidos con el fin de determinar las desviaciones y los ajustes que se requieren realizar para no afectar los rendimientos ni utilidades de la unidad.

Determinar cálculos de diseño preliminares y realizar estudio de hidráulica de tubería acorde al sistema de separación de sólidos a través del simulador Inplant, con el fin de analizar las condiciones operacionales necesarias para las modificaciones propuestas.

## **2. Cuerpo del Trabajo**

### **2.1 Evaluación de las tecnologías ofrecidas en el mercado para separación de sólidos**

#### **2.1.1 *Esquema y condiciones actuales del circuito de slurry***

Se realizó una visita a la planta de Orthoflow para conocer el circuito de slurry del fondo de la torre fraccionadora. Se utilizó la herramienta *Plant Information* (PI) y datos de campo para conocer las condiciones operacionales del sistema y con ayuda del laboratorio de la refinería se determinó por tamizaje la distribución de tamaño de partículas en dicha corriente.

#### **2.1.2 *Revisión de los sistemas de separación de sólidos***

Una vez conocidas las alternativas de tecnologías existentes en el mercado se realizó el acercamiento con cada una de las empresas proveedoras con el fin de conocer las especificaciones de cada sistema resaltando condiciones operacionales y eficiencias para compararlos entre sí.

#### **2.1.3 *Selección de la alternativa***

Se realizó a través de una matriz de evaluación la selección de la alternativa que se ajustaba al alcance del proyecto y cumplía con las premisas estipuladas. Ya definido los hidrociclones como sistema a implementar, se realizan reuniones con la empresa proveedora para estipular datos de diseño y de operación necesarios para la realización de la ingeniería conceptual.

## **2.2 Revisión de variaciones operacionales para instalación de hidrociclones**

### ***2.2.1 Especificaciones hidrociclón***

Luego de varias reuniones con la empresa proveedora y de aclarar las dudas operacionales que existían, se establecieron las condiciones necesarias para que la instalación de hidrociclones sea confiable y segura.

### ***2.2.2 Esquema de cambios propuestos***

Se trazó el esquema con los cambios estipulados en las especificaciones, para visualización de la propuesta y un mayor entendimiento por el lector.

### ***2.2.3 Análisis caldera B-520***

Se realizó la simulación de la caldera B-520 en Aspen Hysys para determinar el grado de desviación en su operación ocasionados por las modificaciones propuestas en el proyecto para verificar que los rendimientos de la unidad no se modificaran con la instalación de los hidrociclones. Esta caldera es utilizada para producir vapor usando el slurry que se recircula a la torre fraccionadora.

## **2.3 Determinación de cálculos de diseño preliminares y estudio de hidráulica de los hidrociclones**

### ***2.3.1 Cálculo de las dimensiones de los hidrociclones***

Se realizaron los cálculos preliminares para dar un estimado de las dimensiones para determinar su ubicación posible en campo dependiendo de las condiciones operacionales estipuladas.

### 2.3.2 Análisis bomba P-526/A

Se realizó un análisis a esta bomba para verificar los máximos y mínimos que puede operar sin afectar el equipo ni el funcionamiento de los hidrociclones a instalar.

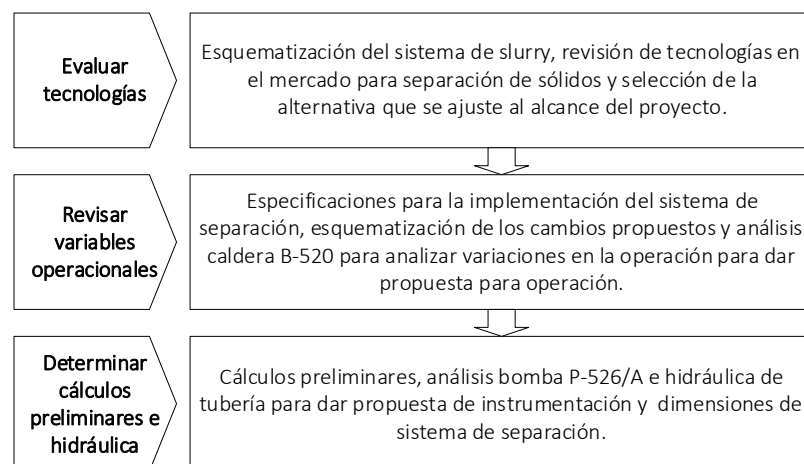
### 2.3.3 Hidráulica tuberías que conectan a los hidrociclones

A partir de toda la información obtenida se simuló a través del software Inplant 4.5 la hidráulica de la tubería que conecta a los hidrociclones y se plantearon propuestas de instrumentación necesarias para las modificaciones con el fin de tener un control en la operación de estos.

Las actividades planteadas anteriormente para el desarrollo del proyecto se esquematizan en la Figura 1 para mostrar de manera sencilla el procedimiento realizado en el proyecto.

Figura 1.

*Metodología empleada para realizar ingeniería conceptual para implementación de un sistema de separación de sólidos en la corriente de slurry.*



### 3. Resultados

Se presentan los resultados de los objetivos planteados de acuerdo a la estructuración de la metodología

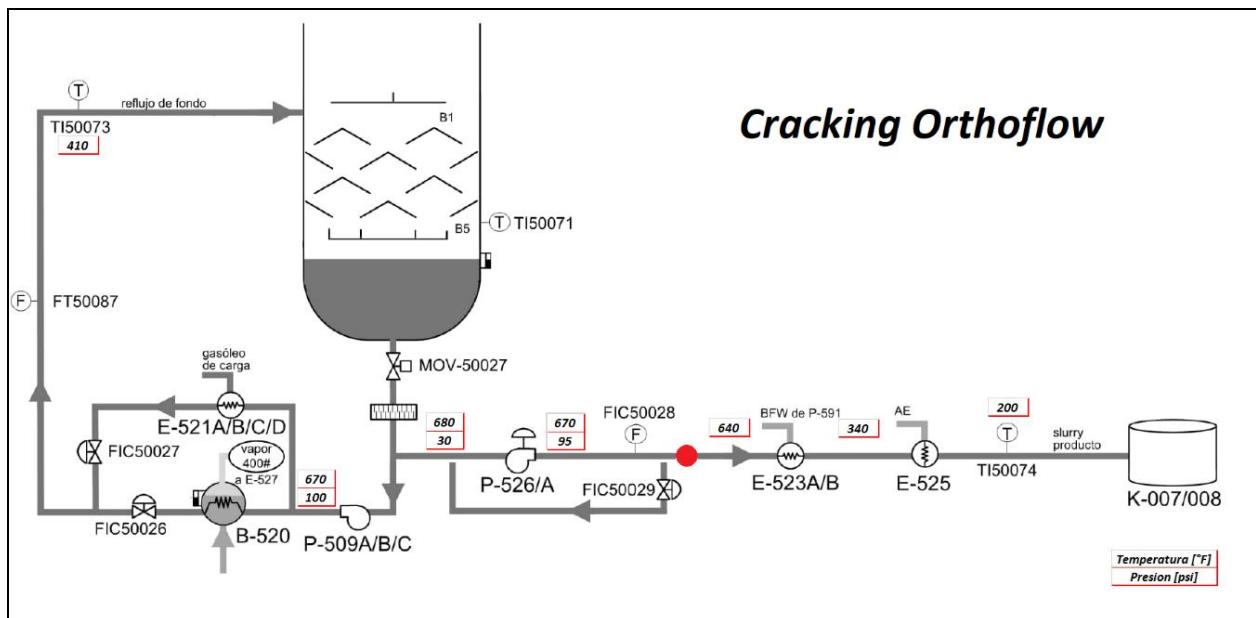
#### 3.1 Evaluación de las tecnologías ofrecidas en el mercado para separación de sólidos

##### 3.1.1 Esquema y condiciones actuales del circuito de slurry

El slurry producto de la Unidad de Craqueo Catalítico Orthoflow luego de abandonar la torre de fraccionamiento principal T-501 se divide en dos corrientes, una es recirculada a la fraccionadora para rectificar la temperatura en la entrada de los gases y la otra restante luego de pasar por un tren de enfriamiento compuesto por los intercambiadores E-523 A/B y E-525 es transportado hacia los tanques K-007/808 ubicados en casa bombas 4 (CB4). En la Figura 2 se observa el circuito de slurry extraído del diagrama grande de control de la unidad y los datos de presión y temperatura tomados en campo.

Figura 2.

*Circuito actual del slurry*



Generalmente en el fondo de la fraccionadora T-501 la corriente de slurry luego de la bomba P-526A tiene las condiciones de operación que se observan en la Tabla 1. En la Tabla 2 se observa la distribución de tamaño de las partículas sólidas aproximada contenidas en esta corriente.

Tabla 1.

*Condiciones de operación de slurry descarga P-526/A*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
Temperatura de operación	°F	690
Presión de operación	psig	80
Viscosidad 690°F	cP	0,82
Gravedad específica @690°F	N/A	0,8692
	Mínimo	1600
Flujo	Promedio	2500
	Máximo	3300

Tabla 2.

*Distribución de tamaño de partícula*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
Concentración de sólidos	% wt	0,05
	Mínima	
	Máxima	0,15
Densidad de los sólidos	ABD	g/ml
	CBD	g/ml
	10%	0,83
	20%	1,17
	30%	1,62
	40%	2,19
Distribución tamaño de partícula	50%	2,91
	60%	3,89
	70%	5,46
	80%	8,77
	90%	15,83
	100%	103,58

### ***3.1.2 Revisión de los sistemas de separación de sólidos***

A continuación, se especifican los aspectos más importantes de cada tecnología con el fin de compararlas. Estos datos fueron obtenidos de las empresas fabricantes y de estudios realizados para analizar sus condiciones.

#### **3.1.2.1 Separadores electrostáticos**

El sistema Gulftronic es el principal representante de esta tecnología y ofrece la mayor eficiencia en el mercado; mediante polarización electrostática, captura partículas de catalizador a escala sub-micrónica en módulos para los cuales, según la secuencia de saturación, se emplea un fluido que usualmente proviene de la carga para limpieza, el cual retira los sólidos separados y por recomendación los retorna al riser [5].

- Esta tecnología no se afecta por taponamientos referentes a contenido de ceras, resinas o asfáltenos.
- Ventana operacional de temperatura entre 320-445 °F, trabajar dentro de ese rango no garantiza una operación segura debido a que es un rango reducido y se pueden presentar fluctuaciones.
- Costo del equipo con instalación y puesta en marcha están alrededor de 12 MMUS\$ [4], por su estructura robusta, diseñada para grandes caudales de flujo.

#### **3.1.2.2 Aditivos químicos para sedimentación en tanques**

Consiste en la adición de aglomerantes que se agregan al slurry antes de la entrada a un tanque de sedimentación, en estos tanques se recomienda disponer de un tiempo de residencia

alto y una temperatura de 200°F para obtener una concentración de sólidos por debajo de 1000 ppm [4]. Si bien, su implementación es rápida y presenta un bajo costo, el problema de los sólidos se traslada a los tanques necesarios para la sedimentación, para los cuales, el tiempo en servicio se reduce y se debe dar disposición a una torta acumulada de carácter peligroso.

- Para el tratamiento de esta clase de sustancias se utiliza el EC3301A ofrecido por el proveedor de la refinería [4].
- Con proyección a cumplir el objetivo principal de cargar el slurry a la torre de vacío de manera segura, la temperatura de entrada de slurry debe ser mayor a 610°F, utilizando sedimentación en tanques con aditivos químicos se debe subir nuevamente la temperatura del fluido. Los especialistas en la planta de Cracking Orthoflow afirmaron la existencia de un horno sin uso (H-552). Se realizaron los cálculos de la energía requerida para calentar el slurry a la salida de E-523 de 352,7-640°F, y se determinó que son necesarios 7,8MMBtu/h (Tabla 3).

Tabla 3.

*Calor requerido para calentar slurry*

<b>CALOR REQUERIDO</b>		
Flujo molar	3000	BPD
API	3,28	°API
Gravedad Especifica	1,05	
Densidad agua	350,49	lb/bbl
Temperatura inicial	352,8	°F
Temperatura final	640	°F
Temperatura promedio	496,4	°F
Flujo másico	45995,64	lb/h
Capacidad calorífica	0,60	Btu/lb °F
<b>Calor requerido</b>	7882188,2	Btu/h
	7,88	MMBtu/h

- El Horno H-552 tiene dos quemadores industriales y funciona con gas combustible. A una eficiencia de 60% el calor que puede absorber el slurry en este horno es de aproximadamente 2MMBtu/h (Ver *Tabla 4*) el cual no es suficiente para alcanzar las condiciones requeridas. Además, al calcular los costos energéticos del gas combustible se estima un costo aproximado de 1000US\$/día (ver *Tabla 5*).

Tabla 4.

*Cálculo de calor del horno*

<b>CALCULO DE CALOR DEL HORNO</b>	
Numero de quemadores	2
Calor máximo liberado	1,6 MMBtu/h
Total, calor liberado quemadores	3,2 MMBtu/h
Eficiencia horno de radiación	60 %
<b>Calor absorbido</b>	<b>1,92 MMBtu/h</b>

Tabla 5.

*Costos energéticos del gas combustible*

<b>COSTOS ENERGÉTICOS</b>	
Precio gas combustible	5 US\$/MMBtu
Costo día de calentar slurry	945,862587 US\$/día
Costo anual	345239,8442 US\$/año

**3.1.2.3 Filtros mecánicos**

Consiste en un sistema de separación mecánico que trabaja mediante la recuperación por retro-lavado, despojando los sólidos retenidos en cartuchos metálicos y direccionándolos mediante una corriente típicamente de hidrocarburo a recircularse al riser de reacción mediante una boquilla especial [5].

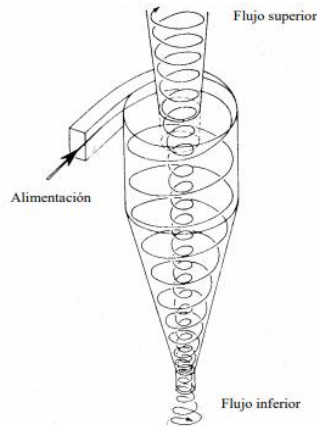
- Se llevaron a cabo dos pruebas piloto de separación con sistemas de filtración PALL a la entrada del tanque K-1271 del departamento de parafinas. La primera prueba con un filtro para separar partículas por encima de 10 micras, arrojó como resultado una rápida saturación debido a la viscosidad del fluido a 150° F, lo cual dio paso a una segunda prueba, con un filtro de la misma tecnología para separar partículas superiores a 25 micras; esta prueba presentó un buen rendimiento y un tiempo de saturación de 8 horas, con lo cual la compañía Ramguz, presentó una propuesta para tratar un caudal de 3.200 BPD de slurry proveniente del tanque K-7 en CB2. La distribución de partículas es menor a 25 micras, (Tabla 2), por lo cual los filtros mecánicos que los proveedores ofrecen no permiten clasificar ese tamaño de partículas en su mayoría.
- Instalar filtros mecánicos presentan riesgos relacionados al taponamiento de los elementos filtrantes por resinas o ceras.

#### **3.1.2.4 Hidrociclones**

Estos sistemas por acción centrífuga y diferencia de densidad, separa partículas sólidas de corrientes líquidas mediante una configuración geométrica sencilla con metalurgia especial resistente a la abrasión, con bajo costo de instalación, de capital y mantenimiento, es la tecnología más económica, pero con más baja eficiencia. La corriente ligera sale por la parte superior (flujo superior) y la corriente rica en sólidos sale por la parte inferior (flujo inferior) [3] (ver *Figura 3*).

Figura 3.

*Flujo de fluido en hidrociclones. Trawinski, Helmut (2010)*



- Resistente a la abrasión, bajo costo de instalación, temperatura de operación dada por la metalurgia, su eficiencia puede estar alrededor del 85%.
- Anteriormente en el circuito de fondo de la fraccionadora T-501 se utilizaban ciclones de la empresa Dorr-Oliver (V-504 A/B) para filtrar las partículas, antes de pasar a los ciclones era cargado el slurry a la torre de vacío T-503 para recuperar la parte liviana contenida en esta corriente para ser recirculada a la torre.

### **3.1.3 Selección de alternativa**

Con la información anterior y los datos obtenidos de los proveedores de estas tecnologías se realiza una matriz de evaluación para seleccionar el sistema de separación de sólidos más factible para el alcance del proyecto, cada uno de los objetivos que debe cumplir tendrá un peso de 2.5 y cada alternativa se evaluará entre 1 a 5 de acuerdo a su viabilidad en cada aspecto, este tipo de matrices son utilizadas en la empresa.

Figura 4.

*Matriz aspectos deseables (AD)*

**ALTERNATIVAS A CONSIDERAR**

No.	DESCRIPCION
1	Instalación de separadores electrostaticos
2	Inyeccion de aditivos quimicos para sedimentacion en tanques
3	Instalacion de filtros mecanicos
4	Instalacion de hidrociclones

**MATRIZ ASPECTOS DESEABLES (AD) - MAXIMOS ESPERADOS**

Análisis y cumplimiento de los objetivos deseables	PESO	CALIFICACION ALTERNATIVAS A CONSIDERAR									
		1	2	3	4						
La propuesta planteada, debe garantizar el tratamiento de la totalidad del slurry de Cracking Orthoflow	2,5	5	5	5	5						
Disposición de sólidos con el mínimo contacto de personal de mantenimiento y menos impacto ambiental	2,5	4	1	2,5	4						
Alta eficiencia en la separacion de sólidos que permita valorizar la corriente de slurry y asegurar la confiabilidad en las iniciativas para su aprovechamiento.	2,5	4	2,5	2,5	2						
Cumplimiento en las ventanas operativas para el control normal de la operación	2,5	1	1	2,5	3,5						
<b>TOTAL (PESO x CALIFICACION)</b>		<b>35</b>	<b>23,8</b>	<b>31,3</b>	<b>36,3</b>						

De acuerdo a la Figura 4 se determina que la tecnología con mayor viabilidad es la No.4 que corresponde a la instalación de hidrociclones, ya que asegura una operación confiable dentro de las ventanas de integridad, una disposición segura de los sólidos reciclándolos al sistema de reacción y garantizando el tratamiento de la totalidad del slurry. A pesar de no ser la tecnología con mayor eficiencia, este sistema cumple con las especificaciones requeridas para alcanzar el objetivo de este proyecto.

**3.2 Revisión de variaciones operacionales para instalación de hidrociclones**

**3.2.1 Especificaciones hidrociclón**

- Para realizar el cargue de slurry a la torre de vacío T-205 se instalarán dos hidrociclones en paralelo, para rotación cuando entre uno de ellos en mantenimiento, se estima que un hidrociclón puede operar por seis años sin problemas. La corriente con slurry clarificado será cargada a la torre de vacío en Refinación de Crudos y la corriente rica en sólidos extraída

por la parte inferior del hidrociclón, será diluida con ALC (Aceite liviano de ciclo) y recirculada al riser de reacción a una boquilla independiente la cual su ubicación y tipo de boquilla deberá ser definida por el licenciador de la FCC Orthoflow (KBR – M.W. Kellogg).

- Los fabricantes de los hidrociclones sugieren que para retorno de cenizas al riser de reacción se requiere una boquilla nueva a una altura diferente. Actualmente no se tiene esta facilidad, se debe diseñar una nueva boquilla la cual requiere del aval del licenciador y definiciones técnicas para su ubicación y diseño. No se recomienda mezclar esta corriente con la carga al riser debido a su composición en sólidos y viscosidad lo cual puede generar inconvenientes en las boquillas por una mala distribución de la carga a la unidad generar problemas de corrosión.

- Se requiere la dilución de la corriente rica en sólidos que sale por el fondo del hidrociclón ya que la alta concentración en cenizas puede acelerar la velocidad de erosión en las líneas y en la boquilla de recirculación al riser. Según la experiencia de varias refinerías, para diluir el slurry se utiliza ALC de lavado del 10% del flujo de la corriente de alimentación.

- Temperatura normal de operación del fondo de la fraccionadora (675-695) °F y el contenido de asfaltenos entre 0,4 y 0,7%wt en el slurry no generan afectación en los hidrociclones ya que a altas temperaturas la viscosidad del fluido disminuye y permite una mejor filtración. Se recomienda realizar un análisis cuando la unidad entre en funcionamiento para conocer su valor actual en asfaltenos.

- El caudal de flujo tiene un efecto dramático sobre la eficiencia de separación en el hidrociclón, no se recomienda una reducción por debajo del 70% del caudal de diseño. Para prevenir esto, a la corriente de slurry clarificado se le instalará una facilidad para recircular el slurry a la alimentación para mantener un flujo constante hacia el hidrociclón cuando esté operando a bajo flujo. Para llevar un control de esta corriente se instalará un medidor de flujo en la entrada del hidrociclón FT-50128, su señal se enviará al DCS. Estas mediciones se implementarán en la U500 y quedará a cargo del tablerista de esta unidad en constante comunicación con el tablerista encargado en la U200.

- Para la corriente de recirculación al riser se requiere la instalación de medidores de temperatura, presión y flujo ya que la zona de reacción es muy importante para la unidad y estas variables pueden afectar el balance de masa y energía.

- El tren de enfriamiento de slurry que corresponde a los intercambiadores E-523 A/B y E-525 saldrá de funcionamiento, por lo que estos sistemas se deberán conservar por si es requerido desviar la corriente hacia tanques, el cual se realizará por abertura en válvula MOV que se instalará en esta línea, sacar estos equipos podría generar los siguientes impactos, por lo que se estudia el caso:

- o Afectación en el perfil térmico de la T-501: Una parte del slurry que sale del fondo de la fraccionadora T-501 es recirculado de nuevo a esta torre para controlar y mejorar el perfil térmico de la torre variando los rendimientos de los productos según sea requerido, la variación en la temperatura del slurry podría afectar este proceso.

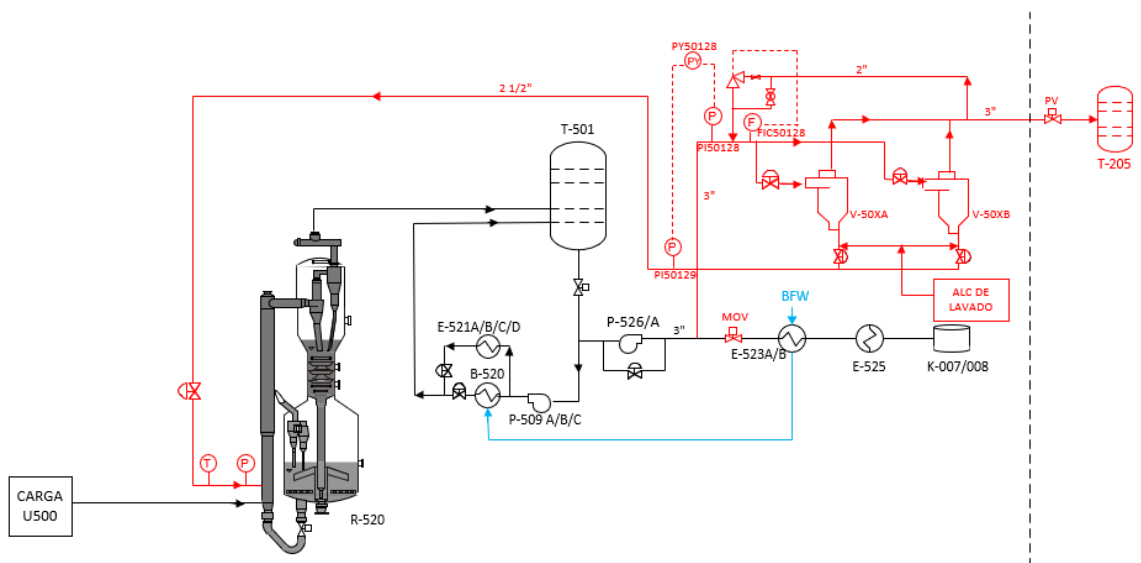
o Afectación de la generación de vapor en la B-520: El agua de calderas procedente del E-523 A/B es utilizado para generación de vapor en esta caldera, con la salida de este intercambiador se puede afectar la transferencia de calor al agua y disminuir el vapor producido que es de gran utilidad en la unidad (ver Figura 2).

### 3.2.2 Esquema de cambios propuestos

Según las especificaciones mencionadas en el inciso anterior se ilustra el esquema de cambios, las corrientes en color negro hacen referencia a las existentes y las rojas hacen referencia a las nuevas a instalar.

Figura 5.

Esquema de cambios circuito de slurry



### 3.2.3 *Análisis caldera B-520*

Con el fin de evaluar las afectaciones causadas por la salida del tren de enfriamiento de slurry se procede a realizar un análisis a la caldera B-520 simulándolo en Aspen Hysys V10, los pasos realizados se especifican en el Apéndice A, del cual se determina que:

- La variación en la temperatura de salida de la caldera B-520 del slurry con el cambio de la reducción de la temperatura del agua de caldera es del 5,96% menos y un aumento en el calor intercambiado del 10,7% (Ver Figura 6 y Figura 7 respectivamente)
- La variación en la temperatura del slurry en la salida de la caldera con el aumento en el flujo del agua de caldera es del 1,8% menos y un aumento en el calor intercambiado del 3,37%, lo cual es poco significativo en el proceso, (Ver Figura 8 y Figura 9 respectivamente)
- El perfil de temperatura de la torre T-501 no se ve afectado por la variación en la temperatura de recirculación del slurry (ver Tabla 6). La salida de funcionamiento de la caldera B-520 provoca que la producción de vapor de alta tenga una reducción de 1800 lb/h.

Tabla 6.

*Perfil de temperatura de la torre T-501*

N° Plato	Perfil de Temperatura a operación normal [°F]	Perfil de Temperatura sin E-523A/B [°F]	Diferencia [°F]	N° Plato	Perfil de Temperatura a operación normal [°F]	Perfil de Temperatura sin E-523A/B [°F]	Diferencia [°F]
1	230	230	0	9	590,1	589,7	0,4
2	314,7	314,5	0,2	10	608,1	607,6	0,5
3	383,6	383,4	0,2	11	620,4	620	0,4
4	423,4	423,1	0,3	12	631	630,5	0,5
5	452	451,7	0,3	13	644,6	644,1	0,5
6	483	482,7	0,3	14	675,3	674,8	0,5
7	527,8	527,5	0,3	1 LCO SS	468	467,8	0,2
8	566,8	566,4	0,4	2 LCO	424,7	424,5	0,2

Figura 6.

*Cambio en la temperatura de salida de slurry*

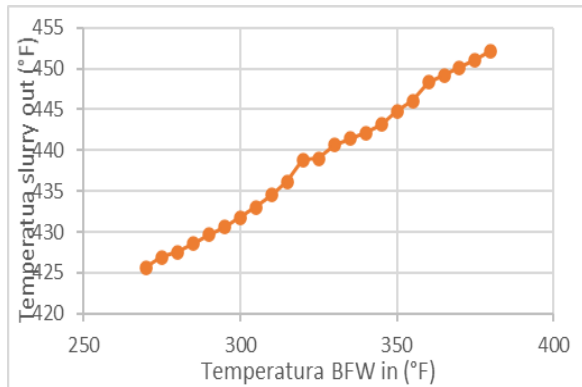


Figura 7.

*Variación en el calor intercambiado*

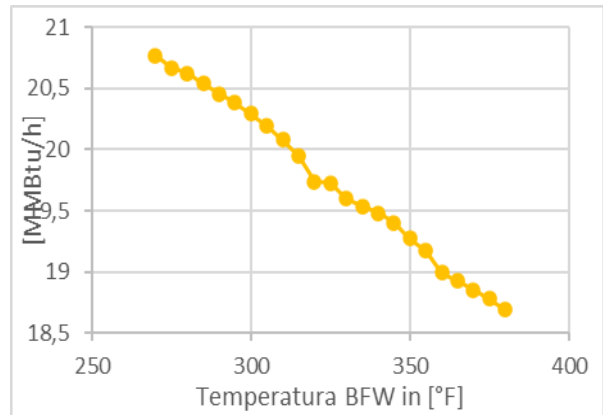


Figura 8.

*Influencia del flujo BFW (agua de calderas) en la temperatura de salida de slurry*

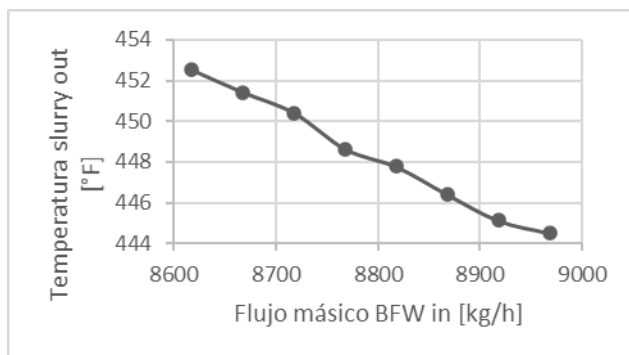
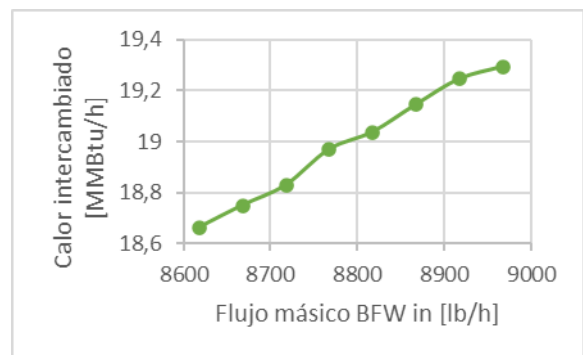


Figura 9.

*Influencia del flujo BFW (agua de calderas) en el calor intercambiado*



### 3.3 Determinación de cálculos de diseño preliminares y estudio de hidráulica de los hidrociclones

#### 3.3.1 Cálculo de las dimensiones de los hidrociclones

Las principales variables geométricas de diseño de un hidrociclón (Figura 10) [1] son:

Diámetro del hidrociclón (D): es el diámetro de la sección cilíndrica de alimentación. Considerada la variable de mayor importancia que controla los radios de órbita y de fuerza centrífuga que actúa sobre las partículas.

Diámetro de alimentación (Di): es el diámetro de entrada de la corriente de alimentación. Regula la velocidad de inyección del momento de rotación. Este diámetro será equivalente al diámetro de tubería (Dt) de la siguiente forma:

$$D_i = D_t \quad (\text{Ec. 1})$$

Algunos autores coinciden en limitar Di en el siguiente rango:

$$\frac{D}{7} \leq D_i \leq \frac{D}{6} \quad (\text{Ec. 2})$$

Diámetro localizador del vórtice (Do): es el diámetro interior de la descarga superior, controla tanto la separación como el flujo en el hidrociclón.

$$\frac{D}{8} \leq D_o \leq \frac{D}{5} \quad (\text{Ec. 3})$$

Diámetro del ápice (Du): es el diámetro interior de la descarga inferior. Su tamaño debe ser tal que no obstruya la evacuación de los sólidos. En [3] se plantea el siguiente rango:

$$\frac{D}{10} \leq Du \leq \frac{D}{5} \quad (\text{Ec. 4})$$

Relación  $Du/Do$ : en [1] se propone el siguiente rango para lograr las condiciones normales de operación:

$$0.34 \leq \frac{Du}{Do} \leq 0.9 \quad (\text{Ec. 5})$$

Altura del localizador del vórtice ( $h_{lv}$ ): distancia que penetra el  $Do$  dentro del hidrociclón. Su función es evitar el corto circuito de las corrientes de alimentación y el flujo superior, se propone:

$$0.33D \leq h_{lv} \leq 0.4D \quad (\text{Ec. 6})$$

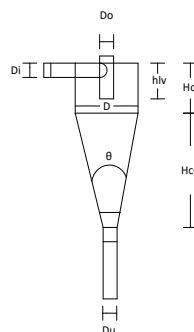
Altura de la sección cilíndrica ( $H_{ci}$ ): longitud del cuerpo cilíndrico del hidrociclón, permite el inicio del fenómeno de separación y define el tiempo de residencia.

Altura de la sección cónica ( $H_{co}$ ): longitud del cono del hidrociclón.

Ángulo de cono ( $\theta$ ): ángulo que define la conicidad del hidrociclón. Conicidades mayores de  $45^\circ$  se emplean para separación de sólidos de acuerdo a la gravedad específica.

Figura 10.

*Variables de diseño de un hidrociclón.*



Luego de realizados los cálculos y de hacer el acercamiento con la empresa fabricante se proponen las medidas para el diseño del hidrociclón de acuerdo a las ecuaciones ya definidas

anteriormente y a los datos que se proponen en [2] y será en proyectos posteriores a este que se ajusten estos valores, estos datos se pueden observar en la *Tabla 7*.

Tabla 7.  
*Valores diseño hidrociclón*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Di		3
Do		3
Du	in	2 1/2
D		20,035
Hci+Hco		120

### 3.3.2 *Análisis bomba P-526/A*

La bomba P-526 es una bomba centrífuga utilizada para el envío de slurry desde el fondo de la fraccionadora T-501 hacia el tren de enfriamiento para su envío final a tanques; con esta iniciativa la bomba se utilizaría para enviar el slurry hacia los hidrociclones que se implementaran para la separación de sólidos para el envío de slurry clarificado a T205, para lo anterior se realizó la revisión de la bomba como los valores reportados en el datasheet y la presión shut off (Tabla 6 y Tabla 7).

Tabla 8.

*Condiciones de operación circuito slurry*

<b>DATOS DE ENTRADA</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Temperatura normal	690	°F

Temperatura máxima	700	°F
Presión operación	80	psig
Gravedad específica operación	0,82	N/A
Presión de vapor	26,1	psia
Viscosidad	0,32	Cp.
Flujo máximo en BPD	3300	BPD
Flujo máximo en GPM	96,25	GPM

Tabla 9.

*Datos P-526/A*

<b>Nombre</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Diferencial de cabeza	255,3	ft
Set presión V1T501	38	psi
Set presión V2T501	39	psi
Set presión V3T501	40	psi
H columna	16,42	ft
H máxima de bomba	288	ft
Diferencial de presión	0,000	psig
Pválvulamáxima	39,00	psig
Pcabezaestatica	5,84	psig
Presión succión máxima	44,84	psig
Diferencial de presión a flujo 0	102,40	psig
Presión descarga máxima	147,23	psig

Con la alternativa propuesta no se superan las condiciones de diseño reportadas para el equipo, de igual manera, aunque esta bomba no trabaja en el punto de mejor eficiencia no ha presentado fallas en los últimos años.

### 3.3.3 *Hidráulica tuberías que conectan a los hidrociclones*

En una red de tuberías por donde pasa un fluido existen pérdidas de presión por efecto de los diferentes fenómenos de transporte. Para determinar la diferencia de presión se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\Delta P = \frac{\Delta H * (SG)}{2,31} \quad (\text{Ec. 7})$$

$$\Delta H = H_d - H_s \quad (\text{Ec. 8})$$

$$\Delta P = P_d - P_s \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

$\Delta P$ : Diferencia de presión entre la descarga y la succión de la bomba.

$\Delta H$ : Diferencial de cabeza entre la descarga y la succión de la bomba.

SG: Gravedad específica medida a condiciones de operación.

Para determinar el diámetro de la tubería se realizará de acuerdo al manual técnico de criterios de diseño de la especialidad de ingeniería de proceso de Ecopetrol (ECP-VST-P-PRO-MT-001).

$$\frac{\Delta P_o}{100} = \frac{\Delta P}{SG \cdot 100} \quad (\text{Ec. 10})$$

Para el cálculo de la presión de descarga máxima o shut off:

$$PCE = \frac{HC \cdot (SG)}{2,31} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$PV = \frac{V1 + V2 + V3}{3} \quad (\text{Ec. 12})$$

$$P_{smax} = PV + PCE \quad (\text{Ec. 13})$$

$$\Delta P(\text{flujo } 0) = \frac{HC \cdot (SG)}{2,31} \quad (\text{Ec. 14})$$

$$P_{dmax} = P_{smax} + \Delta P(\text{flujo } 0) \quad (\text{Ec. 15})$$

Donde:

PCE: presión de cabeza estática [psig]

HC: Altura de columna [ft]

PV: Presión de válvula máxima [psig]

P<sub>smax</sub> y P<sub>dmax</sub>: Presión de succión y descarga máxima respectivamente [psig]

Se utilizó el software INPLANT 4.5 para determinar los cálculos hidráulicos simulando las líneas correspondientes a la red de circuito de hidrociclones, además, se utilizó InstruCalc5.0 para el dimensionamiento de los elementos de control requeridos y las platinas de orificio propuestas.

Para determinar los criterios necesarios para dimensionar las líneas, se realizaron los cálculos correspondientes a presiones, diámetro de tubería y demás teniendo en cuenta los parámetros de la bomba P-526/A y parámetros de diseño de los hidrociclones acordados junto con el fabricante, el procedimiento se puede observar en el Apéndice B, como resultados se obtuvo:

- El diámetro de alimentación de los hidrociclones se establece en 3 in, esta línea tendría una caída de presión de 0,48 psi por lo que no existirían problemas erosionales ni de presión. Se requiere el diseño de una platina de orificio para control de flujo a la entrada, con diámetro de 1,73205" y gama de 0-100 inH<sub>2</sub>O.
- El diámetro de la tubería de la corriente de salida superior de los hidrociclones es fijado en 3 in, con caída de presión máxima de 6,42 psi. Se requiere la instalación de una válvula globo con diámetro 2 in según su diseño.
- Cuando el flujo de entrada a los hidrociclones sea inferior a 2500 BPD se deberá abrir una válvula que permita la recirculación de flujo entre 900 y 1700 BPD dependiendo de la necesidad. El diámetro de la tubería será de 2 in y el de la válvula de 1,5 in.
- Se requiere un flujo de ALC de lavado de 330 BPD máximo para la tubería del fondo del hidrociclón enviada como reciclo a R-520, con diámetro de línea para sólidos recirculados de 2,5 in.

#### 4. Conclusiones

En el desarrollo de este proyecto se evaluaron las alternativas ofertadas en el mercado determinando como viable la N.4, que corresponde a la instalación de hidrociclones en la corriente del circuito del fondo de la fraccionadora T-501 después de las bombas P-526/A y antes del tren de enfriamiento (E-523 A/B y E-525)

Los hidrociclones son la tecnología que más se ajusta a las condiciones de la planta, aunque no tienen la mayor eficiencia, son los más flexibles con respecto a los cambios de operación que se puedan presentar, su diseño y materiales lo hacen resistente a la corrosión.

Con respecto a los cambios en el circuito del fondo de la fraccionadora, la instalación de los hidrociclones y la salida del tren de enfriamiento no afecta considerablemente el rendimiento de la torre fraccionadora ni la producción de vapor en la caldera B-520.

Se analizó la viabilidad técnica del proyecto en el diseño hidráulico de las nuevas facilidades requeridas y en la operación del nuevo sistema de hidrociclones a instalar, detallando y determinando los equipos e instrumentación adicional necesaria, todos estos cambios fueron plasmados en el documento de la ingeniería conceptual.

## 5. Recomendaciones

Se recomienda realizar un seguimiento a la boquilla de carga de la unidad para evidenciar que no exista degradación por la recirculación de contenido de cenizas a la unidad.

Se sugiere la dilución de la corriente rica en sólidos que sale por el fondo del hidrociclón, ya que la alta concentración en cenizas puede acelerar la velocidad de erosión en las líneas y en la boquilla de recirculación al riser. Evaluar la utilización de APC como corriente para realizar la dilución.

Se propone realizar un análisis periódico del valor en asfaltenos a la salida de la fraccionadora para verificar que no generen afectación a los hidrociclones debido a que deben manejarse entre 0,4 y 0,7% wt.

Se sugiere la evaluación de las dimensiones del hidrociclón propuestas en este documento, con los fabricantes del equipo para corroborar que se ajusten a los objetivos del proyecto.

### Referencias Bibliográficas

- Aristizábal Tórres, I. D., Salazar Molina, C. A., y Oliveros Tascón, C. E. (1998). *Parámetros de diseño de un hidrociclón para clasificar café pergamino*. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín, 51(1), 191-215.
- Arterburn, R. A. (1982). *The sizing and selection of hydrocyclones*. Design and Installation of Comminution Circuits, 1, 597-607.
- Bradley, D. (2013). *The hydrocyclone: International series of monographs in chemical engineering* (Vol. 4). Elsevier.
- Company, N. C. (2019). *EC3301A FCC Settling Aid*.
- Sekellick, R. S. (1999). *FCC slurry oil filtration with Mott Hypulse® LSI filters*. Mott Corporation, 12.
- Houser, T. (2014). *System design specification, GES, Model 3001- Standard design*. General Atomics Electromagnetics, 30.
- International, O. M. (2002). *Marpol 73/78*. Bookcraft (Bath) Ltd, 553.
- Kalota, S., Scalco, V., y Buckingham, R. (2013). *Make money in a slurry*. Hydrocarbon Engineering.
- Petróleo-Ecopetrol, E. C. (2020). *Manual de descripción de procesos Unidad de Cracking Orthoflow*. Gerencia Refinería Barrancabermeja.
- Petróleo-Ecopetrol, E. C. (2020). *Prontuario Interactivo general de la Refinería de Barrancabermeja*. Gerencia Refinería Barrancabermeja.
- Trawinski, H. (2010). *Aplicaciones y funcionamiento práctico de los hidrociclones. Adaptación: Juan Luis Bouso Aragonés*. ERAL, Equipos y Procesos, SA Fecha de consulta mayo del 2010.

## Apéndices

### Apéndice A. Procedimiento análisis caldera B-520

- **Caracterización slurry**

Para realizar el análisis a la caldera B-520 se utilizó el simulador Aspen Hysys V10; inicialmente es necesario conocer su composición para poder realizar el estudio. La determinación de su composición no es exacta debido a la enorme cantidad de componentes que integran la mezcla. Por eso, para caracterizarlo se hace por medio de una curva de destilación (temperatura frente a porcentaje acumulado de líquido destilado), realizada de acuerdo a procedimientos estandarizados por normas y se emplean correlaciones existentes para estimar las propiedades físicas a partir de las temperaturas que conforman la curva de destilación, en la Tabla A.1 y Figura A.1 se observa la caracterización del slurry.

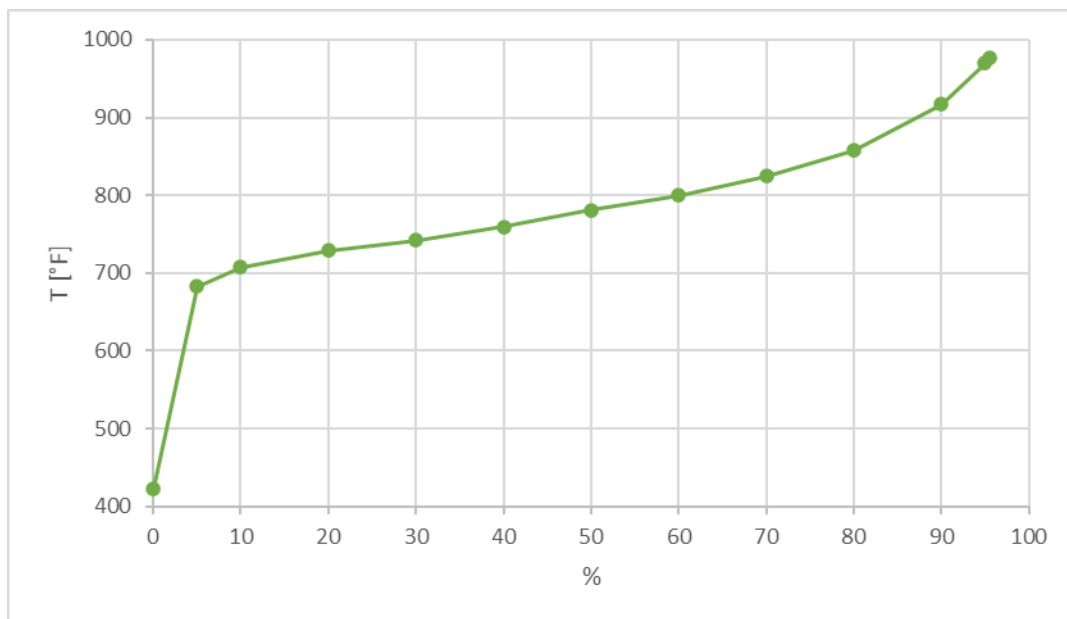
Tabla A.1.

*Caracterización slurry*

<b>Fecha de muestreo</b>	<b>14-feb-20</b>	
<b>Componente</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>
Agua y sedimento	% Volumen	0,5
Azufre total	% Peso	1,73
Cenizas	% Peso	0,036
Densidad a 15 °c	g/mL	1,0439
Gravedad API	°API	3,96
PIE D1160	°C	217,1
5 % recobrado	°C	361,5
10 % recobrado	°C	375,1
20 % recobrado	°C	387
30 % recobrado	°C	394,4
40 % recobrado	°C	404,3
50 % recobrado	°C	415,8
60 % recobrado	°C	426,4

70 % recobrado	°C	440,4
80 % recobrado	°C	458,8
90 % recobrado	°C	491,8
95 % recobrado	°C	520,8
PFE	°C	525.0(95.5%)
Punto de fluidez	°C	12
Punto de inflamación	°C	90
Viscosidad a 100 °C	mm <sup>2</sup> /s	8,73
Viscosidad a 50 °C	mm <sup>2</sup> /s	88,22
D (V,0.5)	micras	2,91
D (V,0.1)	micras	0,83
D (V,0.9)	micras	15,83

Figura A.1.

*Destilación slurry*

- **Datos de diseño**

Luego de conocer las propiedades físicas del slurry se procede a modelar la caldera con los datos de diseño que están en el datasheet del equipo. Al realizarlo se observa en la Tabla A.2 que los datos de simulación concuerdan con los datos de diseño y se valida que la simulación es representativa.

Tabla A.2.

*Datos de diseño y datos de simulación*

		<b>Unidades</b>	<b>Datos de diseño</b>	<b>Simulación</b>
<b>Carcasa- Agua de calderas</b>	Temperatura in	°F	343	343
	Temperatura out	°F	455,2	486,96
	Caída de presión permitida	psi	0,5	0,5
	Calor latente	Btu/lb	763,2	781,4
	Fluido total	lb/h	49433	49433
<b>Tubos- Slurry</b>	Temperatura in	°F	670,3	670,3
	Temperatura out	°F	487,2	466,26
	Caída de presión permitida	psi	40	98
	Fluido total	lb/h	388636	388634
<b>Caldera</b>	Calor intercambiado	Btu/h	42204000	46050770

Seguidamente se ajustan las condiciones de operación con las que actualmente está funcionando el proceso (Tabla A.3), se obtiene un flujo de calor de 17,67 MMBtu/hr.

Tabla A.3.

*Condiciones de operación*

<b>Parámetro</b>	<b>Unidades</b>	<b>Slurry in</b>	<b>BFW</b>
Temperatura	°F	650	380
Presión	psig	80	430
Flujo másico	lb/h	-	19000
Flujo volumétrico	USGPM	285	-

- Análisis de sensibilidad de proceso

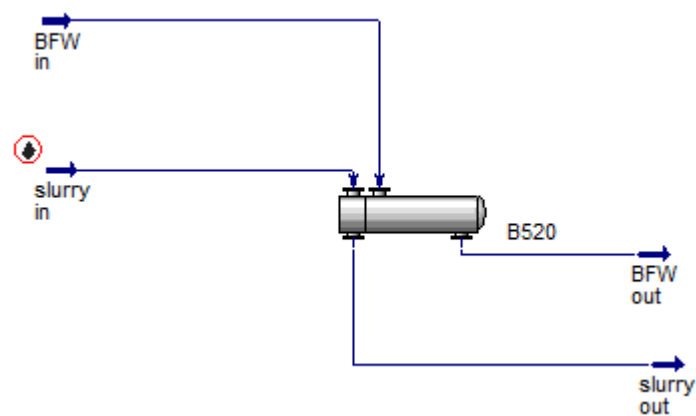
Para determinar la influencia del cambio en las variables de proceso se realizó un análisis de sensibilidad a los siguientes datos:

- ✓ Temperatura del agua de caldera de entrada: Se varió la temperatura en el rango de (400-270) °F
- ✓ Temperatura en la corriente de slurry de entrada: se varió la temperatura en el rango de (670-640) °F
- ✓ Flujo masico del agua de caldera de entrada: Se varió este flujo en el rango de (8618-9000) kg/h

Para cada uno de los casos se calculó la influencia de la variación en la temperatura del agua de caldera en la temperatura de salida del slurry y en el flujo de calor intercambiado en MMBtu/hr, en la Figura A.2, se ilustra la simulación realizada en Aspen Hysys.

Figura A.2.

*Visualización simulación caldera en Aspen Hysys*



Inicialmente se evaluó la influencia del cambio en la temperatura de salida del slurry de la caldera B-520 por la temperatura de entrada de BFW, el valor de BFW es llevado hasta 270°F ya que esa es la temperatura con la que el agua de caldera ingresa a E-523 A/B. Se observa en la Figura 6 que al ingresar más fría BFW disminuye 27°F la temperatura del slurry, esto sucede

debido a la que la diferencia entre las temperaturas de entrada es mayor, lo que permite un aumento de 2 MMBtu/h de calor intercambiado como se muestra en la Figura 7.

A la salida de la caldera B-520 el fluido a 453 °F en operación normal es mezclado con el flujo proveniente del intercambiador E-521A/B/C/D que regula la temperatura de slurry de reciclo en 393,7°F para su ingreso a la fraccionadora, al disminuir la temperatura a la salida de la caldera a 426°F el delta de temperaturas al mezclarse será mayor y provoca una mayor disminución en la temperatura de slurry que ingresa de nuevo a la fraccionadora a 380°F.

Adicionalmente, la caldera B-520 posee un control de nivel que regula el flujo de entrada de BFW si este afecta las condiciones normales de operación de la caldera, se evaluó la influencia del cambio de flujo de BFW en el sistema y se obtuvieron las gráficas correspondientes a las Figura 8 y Figura 9 respectivamente.

Se observa que, si hay un aumento en el flujo de BFW de entrada, la temperatura del slurry a la salida de B-520 disminuirá y a las condiciones de operación sin E-523 A/B no se podría disminuir más el flujo.

Adicionalmente se evaluó la influencia del cambio de la temperatura en la recirculación del slurry en el perfil de temperatura de la torre T-501 y se evidenció que la variación no afecta la operación normal de la torre (Tabla 6.

Perfil de temperatura de la torre T-501).

La producción de vapor de 400 psi es un factor clave en la operación de la caldera B-520, a partir de la simulación se obtuvo que reduciendo la temperatura proveniente de E-523 la producción de vapor se reduce de 4349,1 lb/h a 2460,5 lb/h, que se traduce en costos económicos por la necesidad de ese vapor.

### Apéndice B. Procedimiento análisis hidráulico.

- **Hidráulica tubería descarga P526/A-alimentación de hidrociclón**

La tubería que conectará a la descarga de la P-526/A con la entrada a los hidrociclones, se diseñó a partir de los datos de entrada de la Tabla 1, teniendo en cuenta las condiciones operacionales y de diseño con las que es operada la bomba y transportando por esta tubería un flujo máximo de diseño de 3300 BPD que equivalen a 96,25 GPM. Para determinar la diferencia de presión en la tubería con el fin de determinar el diámetro se utilizaron las ecuaciones 1 y 3, los resultados se observan en la siguiente tabla:

Tabla B.1

*Resultados de presiones descarga P-526/A*

<b>RESULTADOS</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Diferencial de presión	90,770	psig
$\Delta P/100$ ft	0,908	Psi/ft
$\Delta P_o/100$ ft	1,105194805	Psi/ft

La caída de presión está en el rango normal de manejo, por lo cual no habría problema con respecto al dimensionamiento del diámetro de tubería. A partir del flujo máximo permitido en la tubería por diseño y la caída de presión, se estableció el diámetro a través de la siguiente gráfica observando un valor de diseño de 3 in.

Para el cálculo de la presión de descarga máxima o shut off de acuerdo al diseño de la bomba y a las válvulas de seguridad que protegen el sistema de la torre T-501 de la cual se obtiene el slurry, se utilizaron las ecuaciones del 5 al 9, y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla B.2

*Resultados presión shut off P-526/A*

<b>RESULTADOS</b>		
<b>Nombre</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Pvalvulamáxima	39	Psig
Pcabezaestatica	5,838	Psig
Presión succión máxima	44,838	Psig
Diferencial de presión a flujo 0	102,3958442	Psig
Presión descarga máxima	147,234	Psig

Determinados estos valores se dimensionó la línea en inplant con medidas obtenidas del plot plan de la planta de Orthoflow, ya que es una distancia corta, y se obtuvo una caída de presión de 0.48 (Figura B.1), lo cual afirma que en esta tubería no existirán problemas por caída de presión, ni erosionales.

Figura B.1

*Circuito slurry de P-526/A-alimentación hidrociclón.*



- **Hidráulica tubería para corriente superior del hidrociclón enviada a T-205**

Según la distribución de flujos definidos, el 70% de la alimentación saldrá como slurry clarificado por la parte superior del hidrociclón, este flujo corresponde a 2310 BPD, 67.38 GPM. El diámetro es fijado en un valor de 3 in.

Para poder cargar el slurry a T-205 la presión de entrada a la torre de vacío debe ser de 0.8 psia, es por esto que a través de Inplant se simuló la línea de tubería con longitud y número de codos obtenidos por medición en campo, y se determinó que la caída máxima que se daría en esta línea es de 6,42 psi (Figura B.2), es por esto que es necesario la instalación de una válvula de control tipo globo para alcanzar la presión requerida, esta válvula será instalada en la Unidad de Refinación de Crudos, se diseñó en InstruCalc y se obtuvo que la válvula tendrá un diámetro de 2 in (Figura B.3).

Figura B.2.

*Circuito slurry de salida superior a T205*

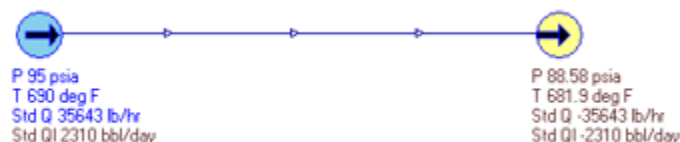


Figura B.3.

*Dimensionamiento PV-290*

Control Valve - Liquid flow

File Units Fluid properties Valve data Options Base cond Help

Input data	Flow Data			Fluid
	Case 1	Normal	Case 2	
Tag	PV-290			SLURRY
Liquid flow	bbl/d	2310	1750	500
Percent of system flow		100	50	10
Flow temperature	degF	690	690	690
Inlet pressure	psig	80	80	80
Valve pressure drop	psi	73.08	74.27	75.76
SG @ flow conditions		0.823	0.823	0.823
Viscosity @ FTP	cp	0.316	0.316	0.316
Vapor pressure	psia	26	26	26
Critical pressure	psia	361.3	361.3	361.3
FL @ % flow		.95	.96	.97
Calculated Cv		7.7397	5.8046	1.6575

Output data	Case 1	Normal	Case 2
Percent of valve Cv	31	23	7
Cavitation index	.94048	.92541	.90721
Noise level	dba	0	0
Sizing pressure drop	psi	63.634	64.93
Flow status		Flashing	Flashing

Valve rated data		
Body	Trim	
Globe	Lin Cavitation	
Flow To	Ports	
Close	One	
Size	in	Cv
2		25
F L	Fd	Kc
.95	1	.73
Pipe sizes		
Inlet	in	Wall
3	3	.216

Calculation options

Valve size  
 Flowrate  
 Pressure drop

By \_\_\_\_\_ Date \_\_\_\_\_

156598

- **Hidráulica tubería para reciclo en hidrociclones**

Para lograr un control en la eficiencia del hidrociclón es necesario que el flujo de alimentación sea constante, es por esto que cuando la planta esté operando a bajo flujo, por debajo de los 2500 BPD en slurry se debe abrir la válvula que permitirá reciclo de flujo del slurry clarificado en la alimentación, este rango estará entre 900-1700 BPD de acuerdo a los parámetros de diseño del equipo. Esta válvula operará con caída de presión mínima. Se utilizó InstruCalc5.0 para determinar el tamaño de la válvula y el diámetro de la tubería, los cuales dieron como resultado 1.5 in y 2 in respectivamente (Figura B.4).

Figura B.4.

*Dimensionamiento válvula reciclo hidrociclones*

The screenshot shows the 'Control Valve - Liquid flow' software interface. It features a menu bar (File, Units, Fluid properties, Valve data, Options, Base cond, Help) and a main window with several data entry sections.

**Input data:**

	Case 1	Normal	Case 2
Tag	FV		
Liquid flow (bbl/d)	1700	900	400
Percent of system flow	100	50	10
Flow temperature (degF)	690	690	690
Inlet pressure (psig)	85	85	85
Valve pressure drop (psi)	80	80	80
SG @ flow conditions	0.823	0.823	0.823
Viscosity @ FTP (cp)	0.316	0.316	0.316
Vapor pressure (psia)	26	26	26
Critical pressure (psia)	361.3	361.3	361.3
FL @ % flow	.95	.96	.97
Calculated Cv	5.4885	2.8763	1.2656

**Output data:**

	Case 1	Normal	Case 2
Percent of valve Cv	39	20	9
Cavitation index	.92163	.92163	.92163
Noise level (dba)	0	0	0
Sizing pressure drop (psi)	68.015	69.411	70.819
Flow status	Flashing	Flashing	Flashing

**Fluid:** SLURRY

**Valve rated data:**

Body	Trim	
Globe	Lin Cavitation	
Flow To	Ports	
Close	One	
Size (in)	Cv	
1.5	14.063	
F L	Fd	Kc
.95	1	.73

**Pipe sizes:**

Inlet	Outlet	Wall
2	2	.154

**Calculation options:**

- Valve size
- Flowgate
- Pressure drop

By: [ ] Date: [ ]

7543

- **Hidráulica tubería para corriente del fondo del hidrociclón enviada como reciclo a R-520A**

Para mantener el control del hidrociclón evitando taponamientos se debe ajustar como caída de presión máxima 50 psi por sugerencia del fabricante. La distribución de los flujos está definida para que por el fondo del hidrociclón (salida Inferior) salga el 30% de la corriente de alimentación, tomando como referencia el caudal máximo de diseño (3300 BPD), el flujo por esta corriente sería de 990 BPD. Además, a esta corriente será inyectado un líquido (ALC) para diluir la concentración de cenizas y reducir los problemas erosionales en esta línea, por sugerencia de los fabricantes esta corriente debe ser del 10% de la corriente de alimentación al hidrociclón, es decir máximo 330 BPD de ALC para un total de 1320 BPD.

De acuerdo a la temperatura de diseño y la presión máxima el tendrá como diámetro de la línea 2 ½ in como su valor recomendado. A través de Inplant se dimensionó la línea y se observó que la presión con la que llegaría el slurry al riser sería de 34,32 psig (Ver Figura B.5).

Figura B.5.

*Circuito slurry reciclo a R-520A*



La presión de entrada al riser está en 18 psig, es por esto que es necesario la instalación de una válvula de control poder alcanzar este valor, en la Figura B.6 se observa cómo se dimensiona la válvula en InstruCalc.

Figura B.6.

*Dimensionamento válvula reciclo a R-520A*

Control Valve - Liquid flow

File Units Fluid properties Valve data Options Base cond Help

Input data	Flow Data			Fluid
	Case 1	Normal	Case 2	
Tag	PV			SLURRY
Liquid flow	1320 bbl/d	990	500	Valve rated data
Percent of system flow	100	50	10	Body Trim
Flow temperature	680 degF	680	680	Globe Lin Cavitation
Inlet pressure	35 psig	35	35	Flow To Ports
Valve pressure drop	34.32 psi	34.84	34.96	Close One
SG @ flow conditions	0.823	0.823	0.823	Size in Cv
Viscosity @ FTP	0.316 cp	0.316	0.316	2 25
Vapor pressure	26 psia	26	26	F L Fd Kc
Critical pressure	361.3 psia	361.3	361.3	.95 1 .73
FL @ % flow	.95	.96	.97	Pipe sizes in Wall
Calculated Cv	7.2038	5.348	2.6739	Inlet Outlet Wall
				2.5 2.5 .203
<b>Output data</b>				<b>Calculation options</b>
Percent of valve Cv	29	21	11	<input checked="" type="radio"/> Valve size
Cavitation index	.69143	.68111	.67878	<input type="radio"/> Flowgate
Noise level	0 dbA	0	0	<input type="radio"/> Pressure drop
Sizing pressure drop	23.708 psi	24.197	24.69	By Date
Flow status	Flashing	Flashing	Flashing	11471

En este análisis hidráulico también se dimensiona la platina de orificio necesaria para el control del flujo a la entrada del hidrociclón, ya que debe ser constante para asegurar la eficiencia del equipo, esta platina de orificio se instalará después del reciclo que tendrá el hidrociclón, esto se realiza en InstruCalc Plus 5.0 y que de acuerdo a los resultados evidenciados en la Figura 19, se requiere una platina con un diámetro de orificio de 1,73205” con una gama de 0-100 in H<sub>2</sub>O y un factor de lectura de 3300 BPD.

Figura 19.

*Dimensionamiento de la platina de orificio requerida.*

The screenshot shows the 'AGA Orifice Plate - Concentric - Flange Taps - Liquid Flow' software interface. The window title is 'AGA Orifice Plate - Concentric - Flange Taps - Liquid Flow'. The menu bar includes 'File', 'Units', 'Fluid properties', 'Base cond', 'Inlet pressure', and 'Help'. The interface is divided into several sections:

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

Tag	FT_50128	Fluid	SLURRY
Max flow @ 60F	bbl/d	3300	
Norm flow @ 60F	bbl/d	2500	
Flow temperature	degF	690	
Inlet pressure	psig	80	
Max flow differential	inH2O	100	
SG @ flow conditions		.84	
SG @ base conditions		1.06	
Viscosity @ FTP	cp	.4	
Meter tube ID @ 68F	in	3	
Vent/drain hole dia	in	.09375	
Orifice dia @ 68degF	in	1.73205	
Element material		316 stainless steel	
Meter tube material		Carbon steel	
- Output data:** A table of calculated output parameters.
 

Beta ratio @ flow temp		.578388
Norm flow differ	inH2O	57.39
Norm. flow Reynolds No.		202649
Max pressure loss	inH2O	65.63
Max power loss	hp	.1683
Uncertainty percent		.5911
Min plate thickness	in	.125
<b>Calculation factors @ normal flow</b>		
Plate thermal expansion		1.00597
Velocity of approach		1.06114
Discharge coefficient		.608178
- Calculation options:** A section with checkboxes and radio buttons.
 

<input checked="" type="checkbox"/> Vent hole	<input checked="" type="radio"/> Orifice size
<input type="checkbox"/> Drain hole	<input type="radio"/> Flowrate
<input checked="" type="radio"/> Standard size	<input type="radio"/> Differential range
<input type="radio"/> Custom size	

At the bottom center, there is a 'Calculate' button.