

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Evaluación de los Parámetros que Influyen en el Contenido de Asfaltenos de los Gasóleos
Producto de una Torre de Destilación de Crudo al Vacío de la Refinería de Barrancabermeja
Utilizando el Software Aspen Hysys

Martín Eduardo Díaz Suárez

Trabajo de Grado Presentado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Ronald Alfonso Mercado Ojeda

Doctor en Ingeniería de Productos y Procesos

Codirector

Johan Mauricio Garzón Rojas

Ingeniero Químico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2019

DEDICATORIA

A la memoria de mi tío Jeremías Mejía (QEPD), quien durante tantos años con sus sabios consejos y anécdotas me motivó para salir adelante, ser un gran profesional y sobre todo me enseñó la importancia de ser un gran ser humano.

A mis padres Martín y Cecilia, mi familia, mis amigos y todos quienes me han brindado su apoyo y confianza incondicionales a lo largo de mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida.

A mis mejores amigos: Roger, Fabián, Cami, Dani, Camila y también a Jorge, un hermano mexicano, pues siempre fueron esa voz de aliento y motivación para seguir adelante y gracias a este apoyo he cumplido una meta más en mi vida.

A un grupo incondicional lleno de personas maravillosas con quienes he compartido y he vivido experiencias maravillosas desde que inicié mi carrera: “Bar la Yuca”. Gracias por ser un pilar tan importante para mí y su apoyo constante durante todo este tiempo.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo agradezco a Dios, quien nos bendice con la vida, nos guía a lo largo de nuestra existencia, y es el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Doy gracias a Ecopetrol S.A. por haberme concedido la oportunidad de trabajar con su maravilloso equipo y aprender grandes lecciones para mi vida personal y profesional.

A todo el Departamento de Materias Primas y Productos de la refinería de Barrancabermeja, en quienes encontré una segunda familia que me acogió y me permitió crecer integralmente como persona y como profesional. A “Galladita” por su disposición continua para servir a los demás; a los ingenieros Álvaro, Genaro, Pedro y todos los demás de quienes aprendí cosas maravillosas durante mi práctica profesional.

Gracias los ingenieros de procesos, Johan y Juan Carlos, que hicieron posible el desarrollo de este proyecto y me apoyaron durante su ejecución.

Al profesor Ronald Mercado le agradezco enormemente por su gran amabilidad, colaboración y el tiempo dedicado para guiarme como director en este proyecto.

Y finalmente a todas las demás personas que de una u otra manera han contribuido en este proceso y han estado ahí siempre les agradezco enormemente y les deseo muchas bendiciones.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Marco Referencial	14
1.1 Presentación de la Empresa	14
1.2 Principios Científicos e Ingenieriles.....	17
1.3 Zonas de una torre de destilación de crudo al vacío.....	17
1.3.1 Zona de Fondo	17
1.3.2 Zona Flash.....	18
1.3.3 Zona de Lavado	18
1.3.4 Zona de condensación de GPV	18
1.3.5 Zona de condensación de GLV.....	19
1.4 Simulación de procesos.....	19
2. Objetivos del Trabajo de Grado	21
2.1 Objetivo General	21
2.2 Objetivos Específicos	21
3. Alcance	22
4. Metodología.....	23
5. Análisis de Resultados.....	25

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

5.1	Datos Técnicos y Operacionales	25
5.2	Simulación en Estado Estacionario	26
5.3	Configuración de Internos de la Torre.....	31
5.4	Evaluación de Empaques Alternativos	32
5.5	Pruebas de Carga	34
5.6	Velocidad de la Fase Vapor en la Línea de Transferencia	36
6.	Conclusiones.....	40
7.	Recomendaciones	41
	Referencias Bibliográficas	42
	Apéndices.....	45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Productos U-2100	16
Tabla 2. Subproductos U-2100	16
Tabla 3. Datos de entrada a la simulación	29
Tabla 4. Comparación de los datos reales y datos de la simulación.	30
Tabla 5. Internos de la torre T-2103.	31
Tabla 6. Pruebas de carga a T-2103 y contenido de asfaltenos	35

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Producción de la GRB. Carga 230 kbpd*.	15
Figura 2. Metodología para el desarrollo del proyecto.	24
Figura 3. Histórico carga total T-2103.....	26
Figura 4. Rendimientos del crudo reducido en Aspen Hysys®	27
Figura 5. PFD T-2103 en Aspen Hysys®	29
Figura 6. Perfil de Temperatura T-2103 en Aspen Hysys®	30
Figura 7. Contenido de asfaltenos en GLV y GPV en Aspen Hysys V10 ®.....	35
Figura 8. Velocidad fase vapor en línea de transferencia a T-2103.....	37
Figura 9. Carga a T-2103, Reflujo Caliente y Contenido de Asfaltenos..	38

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. PFD Unidad U-2100	45
Apéndice B. Propiedades principales y normas para la caracterización de los crudos alimentados a la U-2100.....	46
Apéndice C. Conexiones T-2103 en Aspen Hysys ®	46
Apéndice D. Especificaciones de Pump Around de GLV	46
Apéndice E. Pump Around de GPV	47
Apéndice F. Datasheet de la torre T-2103.	47
Apéndice G. Dimensiones de T-2103 en [mm] y distribución de internos.	51
Apéndice H. Configuración de internos T-2103 en Aspen Hysys ®	52
Apéndice I. Especificaciones Anillos Pall. Rasching ®	52
Apéndice J. Empaques metálicos para torres empacadas PDVSA	53
Apéndice K. Especificaciones empaques Koch-Glitsch®	53

Resumen

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL CONTENIDO DE ASFALTENOS DE LOS GASÓLEOS PRODUCTO DE UNA TORRE DE DESTILACIÓN DE CRUDO AL VACÍO DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA UTILIZANDO EL SOFTWARE ASPEN HYSYS*

AUTOR: MARTÍN EDUARDO DÍAZ SUÁREZ**

PALABRAS CLAVE: DESTILACIÓN, ASFALTENOS, SIMULACIÓN, HYSYS

DESCRIPCIÓN

En este trabajo se presenta la evaluación de algunos de los parámetros que influyen en el contenido de asfaltenos en los gasóleos obtenidos en una torre de destilación de crudo al vacío, utilizando un simulador de uso comercial. La motivación para la realización de este estudio se debe al hecho de que desde el año 2017, los asfaltenos en los gasóleos de esta sección de la refinería han sobrepasado los límites permitidos por las unidades FCC, donde son enviados como materia prima. Durante el desarrollo del trabajo se recopilaron datos operacionales y de diseño de la sección de vacío para ser utilizados como datos de entrada en la simulación y posteriormente se validaron los resultados, comparándolos con los datos reales de operación. Una vez validada la simulación, se realizaron pruebas cambiando los tipos de empaques de las diferentes secciones de la torre y variando los valores de carga de crudo reducido para analizar su influencia en el contenido de insolubles en n-heptano (asfaltenos), en los gasóleos liviano y pesado de vacío. Los cambios en las secciones empacadas de la torre en el simulador no reflejaron variaciones en el contenido de asfaltenos en los productos, mientras que las modificaciones del flujo de crudo reducido alimentado sí mostraron influencia directa sobre la variable de estudio. Se concluye que efectivamente, el incremento de flujo de crudo reducido alimentado a la columna y rangos de temperatura similares a la salida del horno de precalentamiento, generan una mayor vaporización que conlleva al arrastre de componentes pesados en las corrientes de gasóleo y disminuyen la efectividad de la rectificación en la zona de lavado de la torre. Finalmente, se formularon recomendaciones que incluyen el cambio de los empaques de la torre por unos que ofrezcan mejor contacto líquido-vapor y mantener un flujo de carga que no sobrepase el límite de diseño.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ronald Alfonso Mercado Ojeda, Doctor en Ingeniería de Productos y Procesos. Codirector: Johan Mauricio Garzón Rojas, Ingeniero Químico.

Abstract

TITLE: EVALUATION OF PARAMETERS THAT INFLUENCE THE ASPHALTENES CONTENT IN THE GAS OIL FROM A VACUUM CRUDE DISTILLATION TOWER AT THE BARRANCABERMEJA'S REFINERY USING THE SOFTWARE ASPEN HYSYS*

AUTHOR: MARTÍN EDUARDO DÍAZ SUÁREZ**

KEYWORDS: DISTILLATION, ASPHALTHENES, SIMULATION, HYSYS

DESCRIPTION

This paper presents the evaluation of some of the parameters that influence the asphaltenes content in the gas oil obtained in a vacuum distillation tower, using a commercial use simulator. The study was carried out due to the fact that the asphaltenes in the gas oil from this tower have exceeded the limits allowed by the FCC units where they are sent as raw material, since 2017. During the development of this project, operational and design data of the vacuum section were collected to be used as input data in the simulation and subsequently the results were validated, comparing them with the actual operation data. Once the simulation was validated, tests were performed changing some parameters such as the packings of the different tower sections and varying the values of reduced crude oil fed into the column in order to analyze their influence on the insoluble in n-heptane content (asphaltenes), in the light and heavy vacuum gas oil. The changes in the tower packed sections did not reflect variations in the asphaltenes content in the simulator while changes in the flow of reduced crude oil did show direct influence on the studied variable. It was concluded that, in fact, the increase in the flow of reduced crude oil fed into the column and similar outlet temperatures in the preheating furnace generate a greater vaporization that leads to dragging heavy components in the gas oil streams and decreases the effectiveness of the rectification in the wash section of the tower. Finally, recommendations were made such as changing the tower packings by some which offer better liquid-vapor contact and also maintaining a load flow that does not exceed the design limit.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ronald Alfonso Mercado Ojeda, Doctor en Ingeniería de Productos y Procesos. Codirector: Johan Mauricio Garzón Rojas, Ingeniero Químico.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Introducción

La unidad de crudo U-2100 de la refinería de Barrancabermeja es una unidad de destilación compuesta por dos secciones principales: una atmosférica (unidad de fraccionamiento) y una de vacío. Actualmente la unidad se carga para obtener productos valiosos como: Nafta, Jet A1 y ACPM en el lado atmosférico y gasóleos pesados, livianos y asfalto del lado de vacío.

La torre de destilación del lado de vacío hasta el momento no cuenta con una simulación rigurosa, por lo que no es posible tener un modelo que represente las condiciones de operación reales y actuales. En las simulaciones que se han realizado no se han especificado parámetros importantes de la torre como lo son: la altura, diámetro, zonas empacadas y zonas de platos que permiten obtener resultados más aproximados a la realidad. Este último aspecto es muy importante debido a que desde su parada general en el año 2016, en la torre se evidenció un aumento en el rendimiento de gasóleos, gracias a una mayor vaporización en la zona flash. Sin embargo, a partir de la mitad del año 2017 su calidad se empezó a ver afectada, debido a que el contenido de insolubles en n-heptano (asfaltenos) incrementó y superó el valor de referencia exigido por las unidades de craqueo catalítico, FCCs, que es de 0.1 vol. %. Por lo tanto, se identifica la necesidad de realizar una simulación en Aspen Hysys® que represente adecuadamente los datos operacionales reales de la torre de destilación al vacío T-2103 y llevar a cabo pruebas que permitan encontrar la causa del arrastre de pesados en las corrientes de gasóleo, que se presumen están en el valor de carga de crudo reducido o la configuración de internos de la columna.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

1. Marco Referencial

1.1 Presentación de la Empresa

La Empresa Colombiana de Petróleos, Ecopetrol, se originó el 25 de agosto de 1951 mediante la reversión al Estado Colombiano de la Concesión de Mares. Ecopetrol empezó actividades en el área petrolífera como una Empresa Industrial y Comercial del Estado, encargada de administrar el recurso hidrocarburífero del país. En 1961 asumió el control directo de la refinería de Barrancabermeja y trece años más tarde compró la Refinería de Cartagena (Ecopetrol S.A., 2014).

En septiembre de 1983 se descubrió el Campo Caño Limón, un yacimiento con 1.100 millones de barriles y gracias a este campo Colombia se convirtió de nuevo en un país exportador de petróleo a partir de 1986. Más adelante en la década de los años 90 fueron descubiertos los campos de Cusiana y Cupiagua en colaboración con la British Petroleum Company (Ecopetrol S.A., 2014).

En el año 2003 el Decreto 1760 del 26 de junio modificó la estructura orgánica de la Empresa Colombiana de Petróleos y la convirtió en Ecopetrol S.A., una sociedad pública por acciones, ciento por ciento estatal, vinculada al Ministerio de Minas y Energía, liberando al Estado de sus funciones como administrador del recurso petrolero y pasando éstas a la nueva Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH (Ecopetrol S.A., 2014).

Actualmente, Ecopetrol S.A. es la empresa más grande del país con una utilidad neta de \$15.6 billones registrada en 2018 y la principal compañía petrolera en Colombia. Por su

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

tamaño, pertenece al grupo de las 40 petroleras más grandes del mundo y es una de las cuatro principales de Latinoamérica (Ecopetrol S.A, 2014).

La refinería de Barrancabermeja, GRB, está ubicada a orillas de río Magdalena en la ciudad de Barrancabermeja, Santander, empezó a operar con alambiques traídos en 1922 desde Talara en Perú y la capacidad inicial instalada era de 1,500 bpd. La refinería tiene un área de 254 hectáreas en las que están dispuestas más de cincuenta plantas y unidades de proceso, tratamiento, servicios industriales y control ambiental (Ecopetrol S.A, 2014).

La refinería tiene una capacidad instalada de 250 kbpd y una conversión mayor a 80%. Los principales productos obtenidos para una carga normal de 230 kbpd se encuentran en la Figura 1.

Productos	Producción (*), kbd	Usos
Gasolinas	60,0	Consumo vehículos automotores
Diesel	65,0	Consumo vehículos automotores, transporte público y pesado
Jet	23,0	Combustible para aviones turbina o tipo jet
Fuel Oil	20,0	Combustible industrial y marinos
GLP	6,0	Combustible en estufas domésticas y equipo industrial
PGR	3,5	Precursor industria petroquímica (polipropileno)
Disolventes Aromáticos (kb/m)	90	Solventes
Bases lubricantes (kb/m)	55	Aceites lubricantes para motor
Parafinas (ton/m)	3500	Velas, betún, papel parafinado
Disolventes Alifáticos (kb/m)	28	Pinturas, precursores petroquímicos
Polietileno (ton/m)	4000	Plásticos de baja densidad
Azufre (ton/m)	2400	Fertilizantes
Acido (ton/m)	2100	Industria, fertilizantes

Figura 1. Producción de la GRB. Carga 230 kbpd*. Adaptado de: Ecopetrol S.A (2014). Ecopetrol-Refinería de Barrancabermeja. Recuperado de: <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/refinacion/complejo-barrancabermeja>

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

La Unidad de Crudo U-2100 fue diseñada por Arthur G McKee en el año 1968 y entró en funcionamiento en el año 1971. La unidad fue diseñada para cargar 36 kbpd de crudo pesado (21.4 °API) y para el lado de vacío se contaría con una capacidad de 22 kbpd. Gracias a ampliaciones realizadas la unidad puede cargar 40 kbpd del lado atmosférico y hasta 24 kbpd de crudo reducido en el lado de vacío. Actualmente la carga normal a la unidad es de 38,000 bpd y la dieta está compuesta por crudos con características entre 20 y 26 °API. La mezcla de crudos tiene una proporción de 30% de crudos livianos y 70% de crudos pesados (Ecopetrol S.A., 2008). La U-2100 genera varios tipos de productos y subproductos que se encuentran resumidos en las Tablas 1 y 2 respectivamente.

Tabla 1.

Productos U-2100

Producto	Torre	Destino
Nafta Virgen Liviana	T-2101	T-2004, T-171, T-252
Nafta Virgen (Mezclado)	T-2101	Pool
Jet A1	T-2102A	U-4600 (Tratamiento)
ACPM	T-2102B	K-911/928/945/921/922/924
Asfalto	T-2103	K-200/205/206

Nota: Adaptado de Ecopetrol S.A. (2008). Manual de Descripción del Proceso de la Unidad.
Barrancabermeja: Grupo de Excelencia Operacional

Tabla 2.

Subproductos U-2100

Producto	Destino
Gases	VRU FCCs
Gasóleo Atmosférico	K-814/813/812/803
Gasóleo Liviano de Vacío	K-814/813/812/803
Gasóleo Pesado de Vacío	K-814/813/812/803
Asfalto	K-2806/2501/2502

Nota: Adaptado de: Ecopetrol S.A. (2008). Manual de Descripción del Proceso de la Unidad.
Barrancabermeja: Grupo de Excelencia Operacional

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

1.2 Principios Científicos e Ingenieriles

La destilación de vacío es de particular importancia porque permite obtener productos vírgenes de cadenas largas sin craqueo, a partir del crudo reducido que sale de las torres de destilación atmosférica (Ecopetrol S.A., 2008). El principio de operación de estas torres es la condensación de los vapores de fondos pesados y coquizables. Los elementos mecánicos para producir el contacto líquido-vapor, son rellenos especiales ubicados en lechos que permiten incrementar la superficie de interfase, favoreciendo la transferencia de masa (Vega, Ale Ruiz, & Erdmann, 2015) (Watkins, 1973).

El primer corte lateral producido es el Gasóleo Liviano de Vacío (GLV), el segundo es el de Gasóleo Pesado de Vacío (GPV), y se utilizan para cargar unidades hydrocracking y FCC. El producto del fondo es un residuo asfáltico, que es enviado a las unidades de cracking térmico. (Ecopetrol S.A., 2008) El crudo reducido que se alimenta a las torres de destilación de vacío, previamente pasa por un horno en donde se lleva a una temperatura adecuada para vaporizar las fracciones que se desean separar (Ecopetrol S.A., 2008) (Watkins, 1973).

1.3 Zonas de una torre de destilación de crudo al vacío

1.3.1 Zona de Fondo. Normalmente se inyecta vapor de agua en la zona de fondo, al igual que en una torre de destilación atmosférica, pero en este caso cumple la función de “stripping”, es decir, de arrastrar los hidrocarburos livianos que se pudieron haber ido con la corriente líquida. Además, se hace un enfriamiento rápido, para lo cual se deriva una cierta cantidad del producto de fondo, se lo enfría y se lo inyecta en forma de lluvia, con el nombre de “quenching” (Gary & Handwerk, 2005).

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

1.3.2 Zona Flash. Al igual que en topping es la zona donde se inyecta la alimentación y tiene unas condiciones de altura, presión y temperatura adecuadas para permitir la separación instantánea del líquido y vapor (Ecopetrol S.A., 2008) (Gary & Handwerk, 2005).

1.3.3 Zona de Lavado. También se conoce como zona Over Flash (OF). El over flash, es un cierto porcentaje que se vaporiza en exceso, lo que permite un buen lavado por debajo del producto más pesado (punto de extracción). Esta sección de lavado tiene como objetivo retener gotas de asfalto arrastradas por los vapores y al mismo tiempo fracciona moderadamente (Vega, Ale Ruiz, & Erdmann, 2015). La cantidad de over flash es variable, pues normalmente dependerá del ajuste de las especificaciones del producto pesado que va a destilar, por lo general este producto es el GPV, que casi siempre va como alimentación a unidades FCC. Las especificaciones de este corte son muy importantes, pues se puede envenenar el catalizador. Por lo tanto, debe cuidarse la alimentación para que tenga la menor cantidad posible de impurezas y el ajuste de las especificaciones se hace con las variaciones del OF (Watkins, 1973) (Gary & Handwerk, 2005). En la parte inferior de la zona hay un plato colector de OF, para recibir el OF condensado y no permitir que vaya a la zona de fondo. El límite superior de esta zona es el plato de extracción del GPV, que es parecido al plato colector de OF (Ecopetrol S.A., 2008).

1.3.4 Zona de condensación de GPV. Se usa una sección empacada para permitir la condensación del GPV, que será recibido como líquido en el plato colector. Ésta es una sección donde se produce una condensación del GPV que se extrae para producción y para utilizarlo como reflujo de la zona de condensación del OF, además, en esta zona se enfrían los vapores de GLV. Ambos calores (de condensación y enfriamiento), son absorbidos por contacto directo dentro de la torre, entre los vapores y una corriente de reflujo circulante (pumparound), que luego cede el calor tomado en intercambiadores externos (Vega, Ale Ruiz, & Erdmann, 2015).

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

1.3.5 Zona de condensación de GLV. A diferencia de la torre de topping, donde el producto más liviano se extrae por cabeza, en una torre de vacío se saca de condensación. Para permitir la condensación del GLV, se introduce en la parte superior de la zona una corriente de reflujo de este GLV. Es importante que la caída de presión en la cabeza y la zona flash sea lo más baja posible. Por lo tanto, se deben usar elementos que no provoquen demasiada caída de presión (Vega, Ale Ruiz, & Erdmann, 2015).

1.4 Simulación de procesos

En los últimos años, el papel de la simulación de procesos en la industria de refinación de petróleo ha venido cobrando importancia y con muy buena razón. Las simulaciones permiten a los operadores e ingenieros modelar virtualmente un proceso de manera detallada, sin tener que gastar tiempo, mano de obra o dinero, evaluando sus diseños en un ambiente real (Kellner, Madachy & Raffo, 1999). Hoy día las simulaciones son de vital importancia en una gran cantidad de refinerías alrededor del mundo, pues permiten observar cómo los procesos son afectados por: cambios en las especificaciones de los equipos, programación, condiciones de operación, entre otras, y permitir así, anticiparse ante cambios futuros y tener un control más apropiado sobre la operación (Arce, 1995).

Hasta el momento, en la refinería de Barrancabermeja se han hecho simulaciones de la torre T-2103 en el software PRO II, pero no tienen la suficiente rigurosidad para permitir una aproximación a la realidad operacional de la torre y realizar evaluaciones de algunas propiedades fisicoquímicas de los productos, como el contenido de asfaltenos que se pretende evaluar en este trabajo (Ecopetrol S.A., 2017). Existen otras herramientas que permiten realizar simulación de procesos, entre ellas, Aspen Hysys. Hysys es un software comercial utilizado para simular procesos en estado estacionario y dinámico, por ejemplo, procesos químicos, petroquímicos,

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

farmacéuticos, alimenticios, entre otros. Además, posee herramientas que permiten estimar propiedades físicas, balance de materia y energía, equilibrios líquido-vapor, curvas de destilación y adicionalmente cuenta con herramientas que permiten caracterizar fracciones del petróleo o bases de datos con propiedades de algunos crudos a partir de datos experimentales (Chaves et al., 2016).

Los asfaltenos son los componentes más aromáticos y más pesados del crudo y su importancia es crítica dentro de todos los aspectos que implica la utilización del petróleo, incluyendo: caracterización de las reservas, producción, transporte y refinado. Los asfaltenos tienen alta influencia en propiedades como: viscosidad, estabilidad de las emulsiones y bajos rendimientos en la destilación (Mullins, 2011). Los asfaltenos se definen comúnmente como la fracción de los hidrocarburos que es insoluble en solventes alifáticos de cadena corta como n-pentano y n-heptano, pero son solubles en tolueno. Debido a que los asfaltenos no se pueden definir como una molécula en específico, dada su alta complejidad macromolecular, sólo se conocen sus estructuras químicas promedio y modelos que han sido desarrollados mediante estudios de sus propiedades (Alayon, 2004). La reducción del contenido de asfaltenos en los gasóleos obtenidos en la destilación al vacío de crudo reducido es muy importante, puesto que se ha demostrado que este tipo de componentes y otros componentes pesados contribuyen a la formación de coque en las unidades FCC; aumentan los requerimientos energéticos en su operación y pueden causar daños irreversibles (Gonçalves, 2002) (Sotelo, 2002).

2. Objetivos del Trabajo de Grado

2.1 Objetivo General

Realizar una simulación rigurosa y evaluar el desempeño de la torre de destilación de crudo al vacío (T-2103), de la refinería de Barrancabermeja en el software Aspen Hysys

2.2 Objetivos Específicos

Validar la simulación de una torre de destilación al vacío mediante la comparación de los datos operacionales obtenidos en el simulador Aspen Hysys con los datos reales de operación en la refinería.

Proponer y evaluar diferentes empaques que permitan mantener el rendimiento y mejorar la calidad de los gasóleos que alimentan las unidades de FCC.

Relacionar el contenido de asfaltenos en los gasóleos de vacío con los diferentes valores de carga de crudo reducido a la T-2103 y contrastar los resultados con los valores reales de operación.

Formular recomendaciones que permitan mejorar la eficiencia de rectificación y optimización de la capacidad de carga de la torre a partir de los datos simulados.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

3. Alcance

La práctica profesional se desarrolló en la refinería de Barrancabermeja-Santander, perteneciente a la Vicepresidencia de Refinación y Procesos Industriales de Ecopetrol S.A. El proyecto se realizó desde el Departamento de Materias Primas y Productos, trabajando en conjunto con el Departamento de Refinación de Crudos y los diferentes miembros que los conforman.

La duración de la práctica fue de seis meses, en los cuales el compromiso principal fue cumplir a cabalidad los códigos de ética y conducta de la compañía durante el desarrollo de las labores asignadas. Se ejecutaron dos etapas principales que fueron: conocer la empresa, con el fin de identificar necesidades o problemas susceptibles de intervención y el desarrollo de un plan de trabajo, incluyendo los recursos requeridos para la ejecución del proyecto; de acuerdo con la reglamentación de trabajos de grado para pregrado de la Universidad Industrial de Santander.

El problema se identificó en la calidad de los gasóleos, producidos en la torre de vacío T-2103 de la Unidad De Procesamiento de Crudos U-2100. Para poder abordarlo se realizó un reconocimiento de la unidad y el equipo de operaciones e ingeniería del departamento, con quienes se asumió el compromiso de aplicar los conocimientos adquiridos durante la formación profesional, para la búsqueda de una solución y recomendaciones que permitiesen mejorar la calidad de estos productos, desarrollando un plan de trabajo avalado por el director del proyecto en la Universidad y el codirector asociado a Ecopetrol S.A.

4. Metodología

Para el desarrollo del proyecto se utilizó una metodología con cinco fases principales: La primera fase fue el reconocimiento del proceso y recolección de datos operacionales de la T-2103; en la segunda fase se realizó la simulación en estado estacionario de la torre y la comparación con los datos reales; en la tercera se configuraron los internos de la torre y se realizaron pruebas con diferentes tipos de empaques; en la cuarta fase se realizaron variaciones en la carga de crudo reducido para analizar su influencia en el contenido de asfaltenos y por último, en la quinta fase, se formularon las conclusiones y recomendaciones respectivas.

La simulación en estado estacionario se realizó en Aspen Hysys V10 ® utilizando los datos de operación reales de la torre como datos de entrada, posteriormente se compararon con los datos obtenidos por el simulador para observar las diferencias y analizarlas.

Las pruebas con los diferentes empaques de la columna y distintos valores de carga de crudo reducido a la T-2103, se realizaron con el fin de comprobar la hipótesis de que estas variables tienen influencia directa en la afectación de la calidad de los gasóleos obtenidos en la destilación al vacío.

Finalmente, se formularon las conclusiones del proyecto a partir del análisis de los resultados obtenidos en cada fase y se dieron algunas recomendaciones para la unidad. En la Figura 2, se representa mediante diagrama de bloque la metodología seguida en este trabajo.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

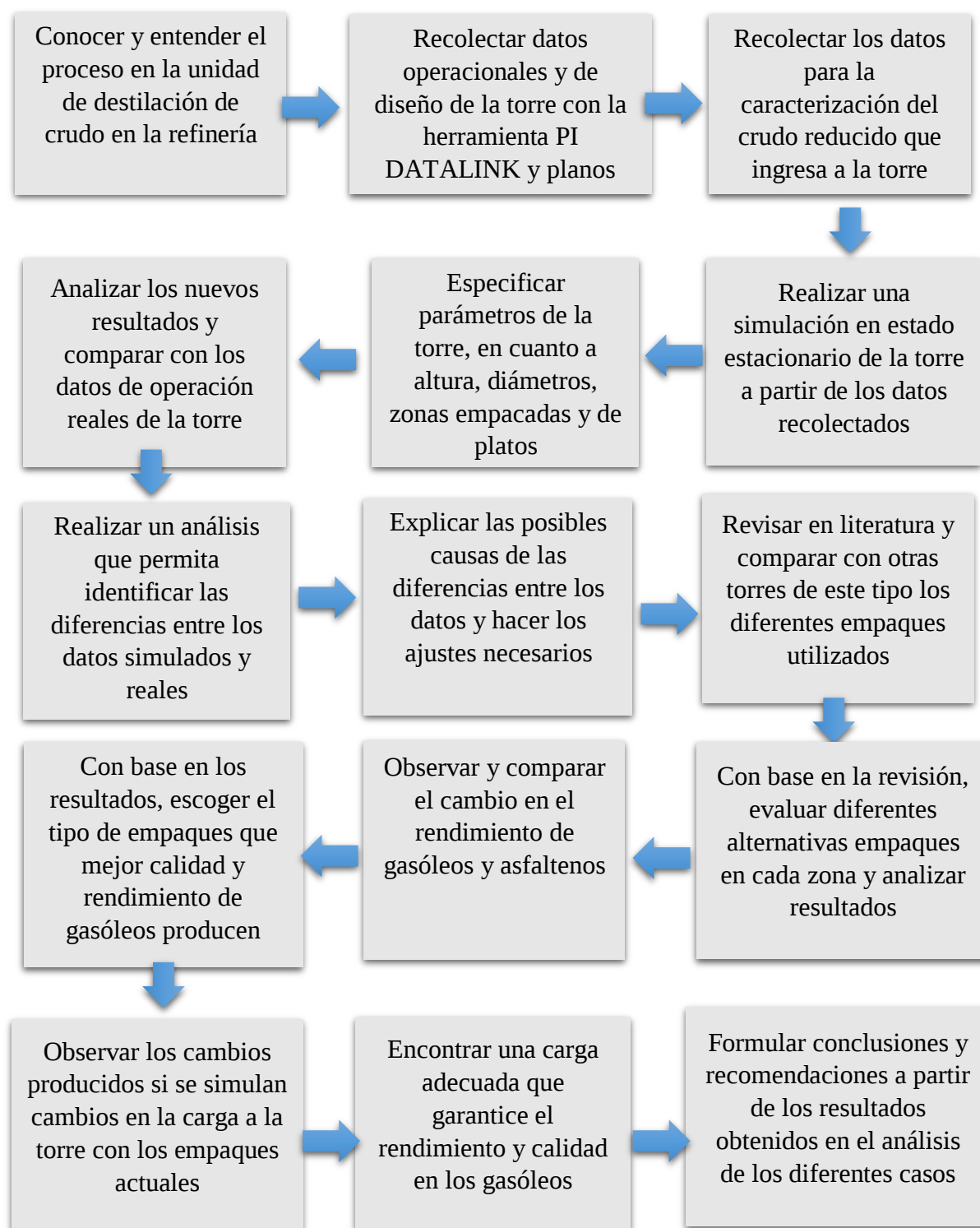


Figura 2. Metodología para el desarrollo del proyecto.

5. Análisis de Resultados

5.1 Datos Técnicos y Operacionales

Para llevar a cabo el proyecto y tener un nivel más profundo de entendimiento sobre la unidad de crudo U-2100, se realizó un reconocimiento durante varios días incluyendo el propósito de la unidad; el flujo de proceso; los equipos y controles asociados a cada sección. Posteriormente, se hizo un acercamiento a la sección de destilación al vacío compuesta por el horno H-2102 y la torre de destilación al vacío T-2103 para comprender su funcionamiento y comenzar la recolección de datos operacionales y técnicos de esta parte de la unidad. En el Apéndice A. *PFD Unidad U-2100* se presenta el diagrama PFD de la unidad U-2100.

La herramienta PI DATALINK permite recolectar datos de operación de la refinería y fue utilizada para recopilar información operacional de la sección de vacío del 01 de enero de 2017 hasta el 31 de diciembre de 2017. Dentro de los datos más importantes están: flujos de alimentación y productos; perfiles de temperatura y presión; entre otros. Esta herramienta facilita el acceso a este tipo de información gracias a los *tags* mediante los cuales están identificadas las distintas variables de operación que puede haber en la refinería y se almacenan en una matriz que permite observar tendencias, valores actuales y periódicos, desde un complemento instalado en Excel (Vanus et al., 2015).

La información técnica y de diseño de la torre de vacío, necesaria para la ejecución del proyecto fue proporcionada mediante datasheets, planos físicos y digitales disponibles en la GRB y utilizada posteriormente para el ingreso de datos en la simulación.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Una de las variables operacionales más importante de la torre es la carga de crudo reducido diaria. A continuación, en la Figura 3, se muestran los valores de carga diaria a la T-2103 desde el 01 de enero de 2017 hasta el día 10 de diciembre de 2017.

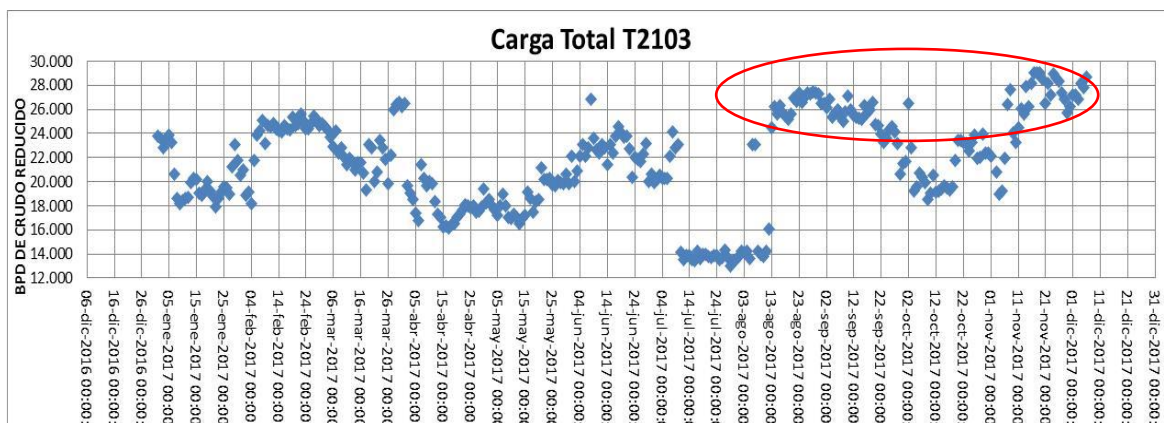


Figura 3. Histórico carga total T-2103. Adaptado de Ecopetrol S.A. (2017). Informe Técnico Condición T2103 (Calidad de Gasóleos a FCCs). Barrancabermeja.

Al analizar la gráfica es posible observar un aumento en la carga del lado de vacío de la unidad de crudo U-2100, por encima de los 24,000 bpd a partir de aproximadamente el 15 de agosto de 2017, situación que coincide con la afectación de la calidad de los gasóleos, principalmente en el contenido de insolubles en n-heptano (asfaltenos) con valores superiores al de referencia para las unidades de cracking catalítico, FCCs. Este hecho apoya la hipótesis de que el volumen de crudo reducido alimentado a la torre tiene influencia en la calidad de los productos allí obtenidos.

5.2 Simulación en Estado Estacionario

Además de la información operacional de la torre de vacío es necesario contar también con la caracterización del crudo reducido alimentado a la torre, con el fin de ingresar los datos a un entorno de simulación en el software Aspen Hysys V10®

Debido a que no se contaba con una caracterización propia del crudo reducido que alimenta a la torre T-2103, fue necesario obtener su composición de una simulación existente de la torre de

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

destilación atmosférica T-2101 en Aspen Hysys®, guardando la corriente de crudo reducido del fondo de la torre como un Assay. En dicha simulación se encuentra la caracterización de los crudos que son mezclados para alimentar la U-2100. Las propiedades principales de los crudos incluyen: destilación TBP, densidad API, viscosidad, contenido de asfaltenos, contenido de azufre, entre otros. En el Apéndice B se presentan las propiedades principales y normas utilizadas en el laboratorio de la refinería de Barrancabermeja para su caracterización.

Una vez ingresados los datos del crudo reducido, es posible observar los rendimientos que se pueden obtener en la destilación al vacío de este hidrocarburo, como se muestra en la Figura 4.

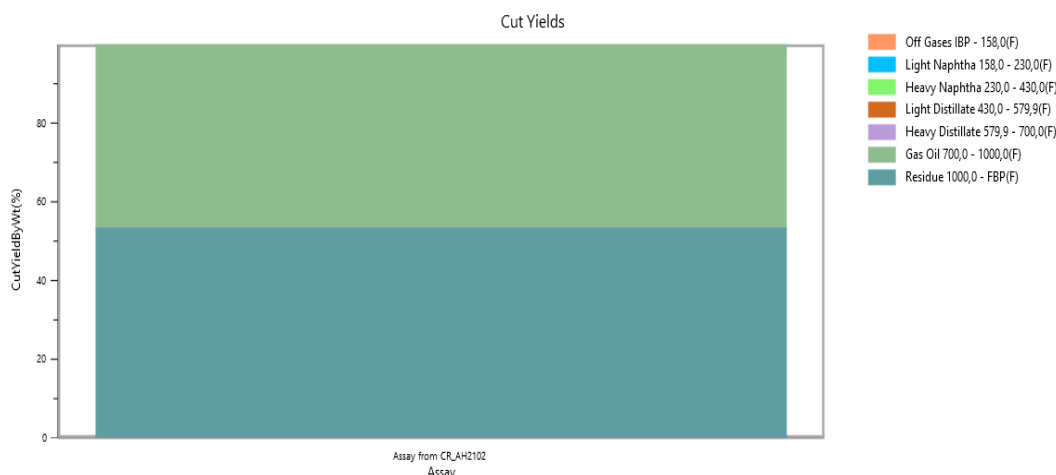


Figura 4. Rendimientos del crudo reducido en Aspen Hysys®

Al analizar la Figura 4, es posible afirmar que del crudo reducido aproximadamente el 53% de rendimiento está dado por gasóleos, que tienen puntos de ebullición entre 700-1000 °F (371-538 °C), mientras que el 47% restante es el residuo de la destilación, con puntos de ebullición desde 1000 °F (538 °C) hasta el punto final de ebullición, FBP. Los datos ingresados del crudo reducido permiten a Aspen Hysys® crear una serie de pseudocomponentes que posteriormente definen la corriente de entrada a la sección de vacío de la unidad de destilación de crudos U-2100.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

El paquete de fluidos escogido fue *Peng-Robinson* que es ampliamente utilizado en la simulación de procesos con hidrocarburos y su ecuación de estado ha sido modificada por Aspen Technology Inc.® para representar el comportamiento no ideal de las fases líquido-vapor en todo el rango de operación esperado para este tipo de sistemas (Benitez et al., 2015). Las temperaturas y presión de operación de la torre de vacío T-2103 se encuentran dentro de los límites de aplicabilidad de esta ecuación de estado que son: $T > -271\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $P < 100,000\text{ kPa}$. Además, se escogió el modelo *Rackett* para los cálculos de densidad de la fase líquida en el sistema; este paquete es recomendado para mezclas de hidrocarburos a presiones bajas y moderadas como es el caso de la torre T-2103 (Wooley & Putsche, 1996).

Seguidamente, en el entorno de la simulación, se agregan el horno de vacío H-2102 y se utiliza una columna de absorción para modelar la T-2103. En la columna se especifica que el reflujo de cima proviene de un Pump Around y se especifican las corrientes de GLV, GPV y vapor de despojo, como corrientes de salida y entrada opcionales, como se muestra en el Apéndice C.

A continuación, se procede a especificar los datos de presión en el tope y fondo de la torre y la caída de presión en el enfriador de cima. Para definir un Pump Around de GLV es necesario ingresar dos especificaciones, en este caso se ingresan los datos de flujo y temperatura de retorno como se observa en el Apéndice D. *Especificaciones de Pump Around de GLV*, utilizando los datos reales de operación. También es necesario añadir un nuevo Pump Around para el GPV y de la misma manera que el anterior se ingresan las especificaciones de flujo y temperatura de retorno obtenidas mediante PI DATALINK como se aprecia en el Apéndice E.

En la *Tabla 3* se resumen los datos que fueron utilizados como especificaciones originales en la simulación y fueron obtenidos mediante el complemento de PI DATALINK en Excel.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

El PFD elaborado en Aspen Hysys® se encuentra en la Figura 5 y los resultados obtenidos en la simulación se resumen en la *Tabla 4*. Adicionalmente se presentan los valores reales de operación y el error relativo porcentual.

Tabla 3.

Datos de entrada a la simulación

Variable	Valor [bpd]
Carga T-2103	25,500
GLV	5,000
GPV	7,000
Reflujo de cima	4,500
Reflujo medio	37,000
Reflujo Caliente	3,700
Fondos de vacío	12,640
DWO	865

Nota: Valores leídos en campo.

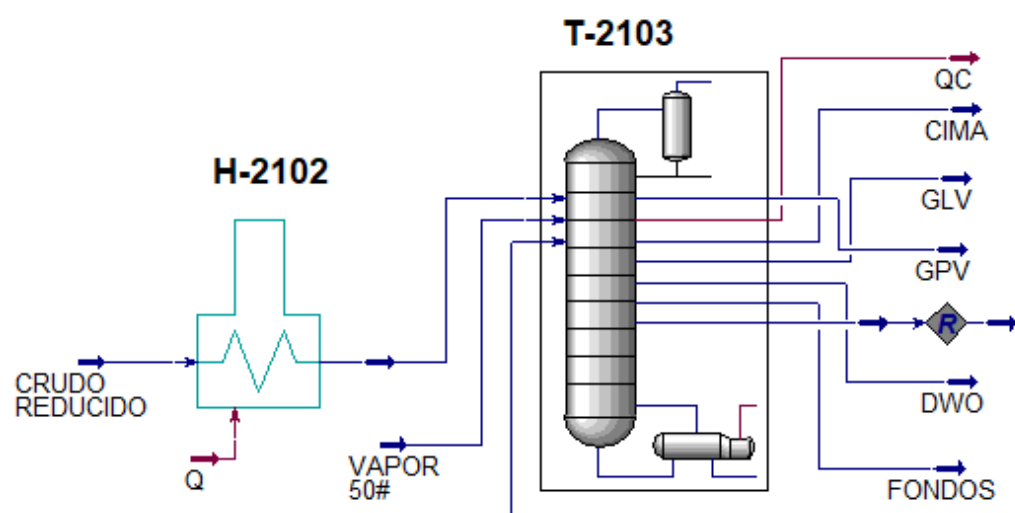


Figura 5. PFD T-2103 en Aspen Hysys®

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Tabla 4.

Comparación de los datos reales y datos de la simulación.

Variable [bpd]	Valor real	Valor en la simulación	Error relativo
Carga T-2103	25,500	25,500	0.0%
GLV	5,000	4,981	0.4%
GPV	7,000	6,988	0.2%
Reflujo de cima	4,500	4,459	0.9%
Reflujo medio	37,000	36,870	0.4%
Reflujo Caliente	3,700	3,694	0.2%
Fondos de vacío	12,640	12,639	0.0%
DWO	865	891	3.0%

Nota: Datos experimentales obtenidos en la simulación y datos reales leídos en campo.

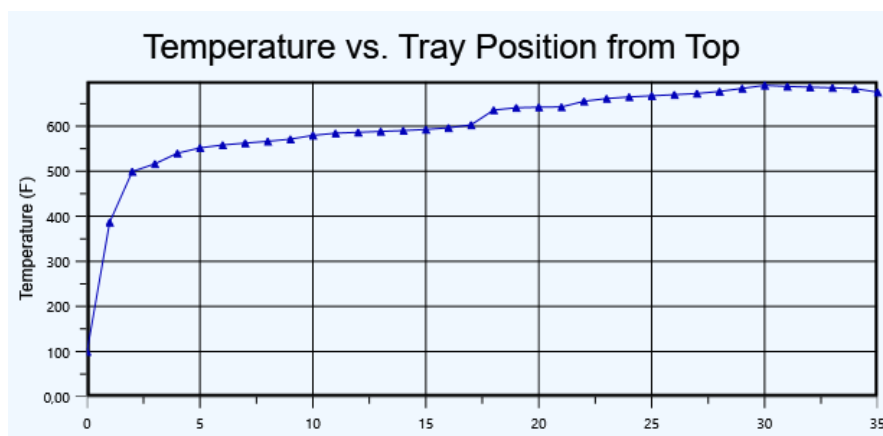


Figura 6. Perfil de Temperatura T-2103 en Aspen Hysys®

Los valores alcanzados en la simulación son muy similares a los valores reales de operación de la T-2103 y cumplen el balance de masa global de la torre. Además, las temperaturas de las diferentes zonas de la torre observadas en el perfil de temperatura de la Figura 6, también coinciden con la información operacional, aunque es una variable que se regula constantemente por las condiciones de la carga y se ajusta realizando cambios en la temperatura de salida del horno y los flujos de Pump Around de GLV y GPV. Por tanto, mediante estos resultados, se valida la simulación de la torre T-2103 realizada en Aspen Hysys V10 ®.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Las propiedades fisicoquímicas de cada corriente pueden variar debido a los datos ingresados del crudo reducido, por tanto, si se desea analizar otro caso en específico, se hace necesario actualizar la información del alimento a la torre y demás corrientes, con el fin de obtener resultados más aproximados a la realidad.

5.3 Configuración de Internos de la Torre

Una vez la simulación ha convergido con la información básica de operación, se procede a complementarla con los detalles de diseño de la torre. En este caso la simulación de la T-2103 se complementó con los datos de diámetros, altura, zonas empacadas y de platos, y los tipos utilizados para cada caso. La T-2103 cuenta con 3 zonas de distinto diámetro que se configuraron en Aspen Hysys® de acuerdo con el Datasheet de la torre T-2103 que se encuentra en el Apéndice F y fue elaborado por la empresa Tipiel S.A.

A continuación, en la *Tabla 5* se resumen las diferentes secciones empacadas de la torre y sus detalles de diseño. Así mismo, en el Apéndice G se presenta la torre T-2103 con sus medidas y la distribución de internos

Tabla 5.

Internos de la torre T-2103.

Zona	Diámetro [mm]	Tipo de empaque o platos	Altura empacada [mm]
Gasóleo liviano	2896	Malla Glitsch	594
		Anillos Ballast	1133
Gasóleo pesado	4877	Malla Glitsch	882
		Anillos Ballast	693
Lavado	4877	Malla Glitsch	937

Nota: Adaptado de Ecopetrol S.A. (2008). Manual de Descripción del Proceso de la Unidad. Barrancabermeja: Grupo de Excelencia Operacional.

Seguidamente, se procede a ingresar la información de internos de la torre en Aspen Hysys® como se aprecia en el Apéndice H. Al observar en el datasheet de la torre T-2103, se encuentra

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

que algunas secciones están empacadas con anillos Ballast de 2" y material SS-316 L, que en la industria son conocidos también como anillos Pall de acero inoxidable. En el Apéndice I se encuentran las especificaciones de los anillos Pall proporcionada por la empresa Rasching USA Inc.®

A pesar de no ser un objetivo de este trabajo, la configuración de internos de la torre T-2103 puede proporcionar la información necesaria para realizar un análisis de su condición hidráulica, representando así una ventaja para la refinería, pues hasta el momento no se contaba con una simulación de la sección de vacío que permitiera evaluar este aspecto de operación de la torre.

5.4 Evaluación de Empaques Alternativos

Una de las hipótesis del presente trabajo es que los tipos de empaques con los que cuenta la torre en las diferentes secciones no son los adecuados para el óptimo contacto líquido-vapor y, por tanto, están permitiendo el arrastre de pesados en las corrientes de gasóleos. Por esta razón, se decidió utilizar la simulación de la T-2103 en Aspen Hysys ® para cambiar el tipo de empaque de sus distintas secciones por los reportados en literatura como los más usados en las unidades de destilación de crudo al vacío y observar los cambios en las propiedades fisicoquímicas de los productos obtenidos.

En el Apéndice J se encuentran los empaques más usados comúnmente en torres de destilación al vacío reportados por la empresa Petróleos de Venezuela S.A. PDVSA (PDVSA, 1994).

Así mismo, la empresa Koch-Glitsch ® proporciona información sobre los diferentes empaques utilizados para este tipo de sistemas. En las tablas presentadas en el Apéndice K se encuentran los detalles más relevantes de algunos de estos tipos de empaques metálicos (Koch-Glitsch, 2015).

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Con información sobre los tipos de empaques utilizados para este tipo de columnas en la industria se procedió a cambiar la configuración de internos de la T-2103 en la simulación de Aspen Hysys®, para observar si se presentaban cambios en los resultados del contenido de asfaltenos en las corrientes de gasóleo pesado y gasóleo liviano.

Las pruebas en el simulador se hicieron variando el tipo de empaque de las secciones de gasóleo liviano, gasóleo pesado y zona de lavado, conservando la misma altura de la sección empacada; sin embargo, al observar resultados se evidenció que el simulador no registraba cambios en las propiedades fisicoquímicas de las corrientes de salida de la columna, pero sí existían variaciones en sus condiciones hidráulicas, aunque en este caso el objetivo no es evaluar dicho aspecto.

Debido a que en Aspen Hysys ® no se evidenciaron cambios en el contenido de asfaltenos de los gasóleos al evaluar diferentes empaques, no se puede realizar un análisis en el simulador con este tipo de variable y concluir cuál tipo de empaque se adapta mejor a la necesidad de mejorar la calidad del GLV y GPV. Sin embargo, con base en la información y recomendaciones proporcionadas por algunos proveedores de empaques, es posible mencionar los que se podrían adecuar mejor para las condiciones de la T-2103.

De acuerdo con estos resultados, los tipos de empaques de la torre T-2103 no son determinantes en el arrastre de asfaltenos, sin embargo, los ingenieros del Departamento de Refinación de Crudos recomiendan cambiar los internos de la columna en la próxima parada general para mejorar la eficiencia del proceso, no obstante, esta acción no garantizará la reducción del arrastre de asfaltenos en las corrientes de gasóleos. La compañía Koch-Glitsch® tiene suficiente experiencia aplicando sus tecnologías a gran variedad de procesos, proporcionando la mejor solución para cada situación en particular. Koch-Glitsch® sugiere la familia de empaques INTALOX®, que agrupa distintos tipos de empaques con aplicaciones en operaciones que implican fenómenos de

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

transferencia de masa o calor (KOCH-GLITSCH, 2015). Dentro de los diferentes diseños de INTALOX® se encuentran los empaques IMTP®, un tipo de empaques aleatorios de alta eficiencia y diseñados especialmente para su uso en operaciones de destilación. Debido a los buenos resultados observados en plantas químicas y refinerías y considerado las ventajas que poseen frente a otros empaques, también han sido utilizados en procesos de absorción, *stripping*, extracción líquido-líquido y operaciones de transferencia de calor por contacto directo (Koch-Glitsch, 2003).

5.5 Pruebas de Carga

Como se observó en la Figura 3, la carga a la torre de vacío T-2103 en el año 2017 tuvo un aumento significativo a partir del mes de agosto, y con este aumento se empezó a evidenciar la afectación en la calidad de los gasóleos producto de la columna, por valores de insolubles en n-heptano (asfaltenos) mayores a 0.1 % vol., valor máximo permitido por las unidades de Cracking Catalítico.

Debido a que, según estos datos, la carga de crudo reducido estaba relacionada de alguna manera con el problema principal de la torre, se procedió a realizar un análisis en la simulación de la T-2103 en Aspen Hysys V10 ®, que permitiera observar la influencia de esta variable en el contenido de asfaltenos y encontrar un valor óptimo de operación sin afectar la calidad de sus productos.

Para realizar las pruebas en el simulador, se utilizaron datos recopilados mediante PI DATALINK, se utilizaron las mismas variables de entrada a la simulación presentadas en la *Tabla 3*, evaluando 7 valores diferentes de carga desde los 20,000 bpd hasta 25,500 bpd. En la *Tabla 6* se presentan los valores de carga de crudo reducido y el contenido de asfaltenos en porcentaje volumen para el gasóleo liviano y el gasóleo pesado de vacío respectivamente.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

En la Figura 7 se encuentran graficados los datos de la *Tabla 6*, además se incluye el valor límite permitido en las unidades FCC, que es de 0.1% vol.

Tabla 6.

Pruebas de carga a T-2103 y contenido de asfaltenos

Carga T-2103 [bpd]	Asfaltenos vol. %	
	GLV	GPV
20,030	0.0454	0.7821
21,075	0.0455	0.7934
22,034	0.0455	0.8006
23,021	0.0455	0.8045
24,019	0.0456	0.8132
25,034	0.0456	0.8191
25,500	0.0456	0.8203

Nota: Valores obtenidos en la simulación.

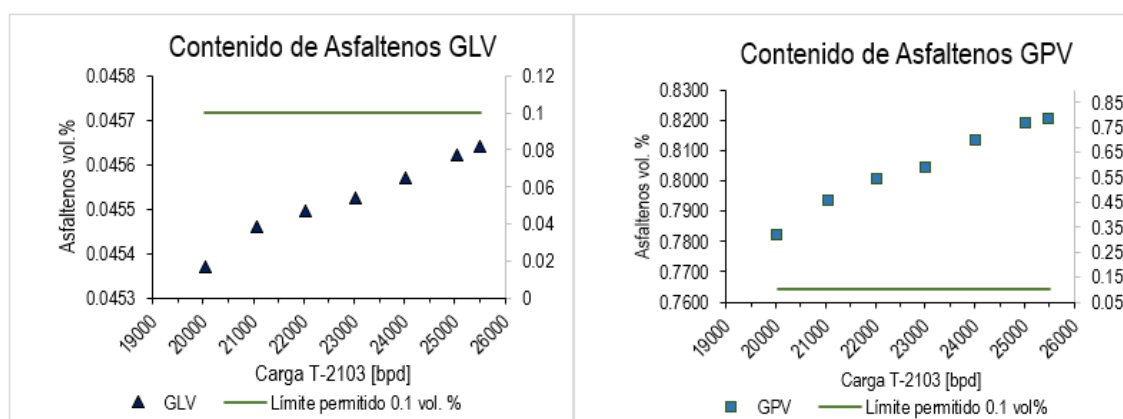


Figura 7. Contenido de asfaltenos en GLV y GPV en Aspen Hysys V10 ®

Efectivamente, el aumento de carga de crudo reducido a la torre de vacío implica un incremento del contenido de insolubles en n-heptano (asfaltenos) en los gasóleos que se producen en la columna. Al observar la Figura 7, es posible apreciar que el aumento del contenido de asfaltenos es directamente proporcional a la carga de crudo reducido en la unidad, sin embargo, se debe tener en cuenta que este valor es el resultado de un cálculo del simulador y puede tener variaciones respecto al valor real.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Al comparar los resultados del contenido de asfaltenos en el GLV y GPV obtenidos en la simulación con los valores reales hallados en laboratorio para diferentes cargas de crudo reducido, se observa que existen diferencias marcadas en ambos casos. Esto obedece a una serie de factores como por ejemplo: los valores obtenidos en el simulador se obtienen mediante correlaciones propias del mismo; la dieta de crudo de la unidad pudo ser diferente cuando se recolectaron datos para laboratorio y por tanto su caracterización no coincide con la que se utilizó para realizar la simulación.

Debido a la sensibilidad de esta propiedad de los gasóleos ante cambios mínimos en la composición del crudo reducido que se alimenta a la torre, no se pueden obtener datos en la simulación semejantes a los datos reales si no se cuenta con la caracterización de la alimentación para cada valor de carga. De acuerdo con el análisis, esta prueba sólo permite percibir la relación entre el flujo de crudo reducido alimentado y el contenido de asfaltenos en los gasóleos, pero no permite determinar una carga óptima para que el valor de insolubles en n-heptano se encuentre dentro del rango permitido, pues en cada caso, el valor obtenido en la simulación no corresponde al valor real determinado en el laboratorio. Esto se debe a que no se dispone de la caracterización del crudo reducido para cada día de operación y las pruebas se ejecutaron siempre con el mismo assay del crudo reducido.

5.6 Velocidad de la Fase Vapor en la Línea de Transferencia

Finalmente se analizó una tercera variable que permite relacionar el valor de carga de crudo reducido con el contenido de asfaltenos en los gasóleos de vacío. En la Figura 8 se presenta el histórico de la velocidad de la fase vapor en la línea de transferencia entre el horno H-2102 y la torre de vacío T-2103. Los datos fueron obtenidos gracias al equipo técnico y operacional del Departamento de Refinación de Crudos.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

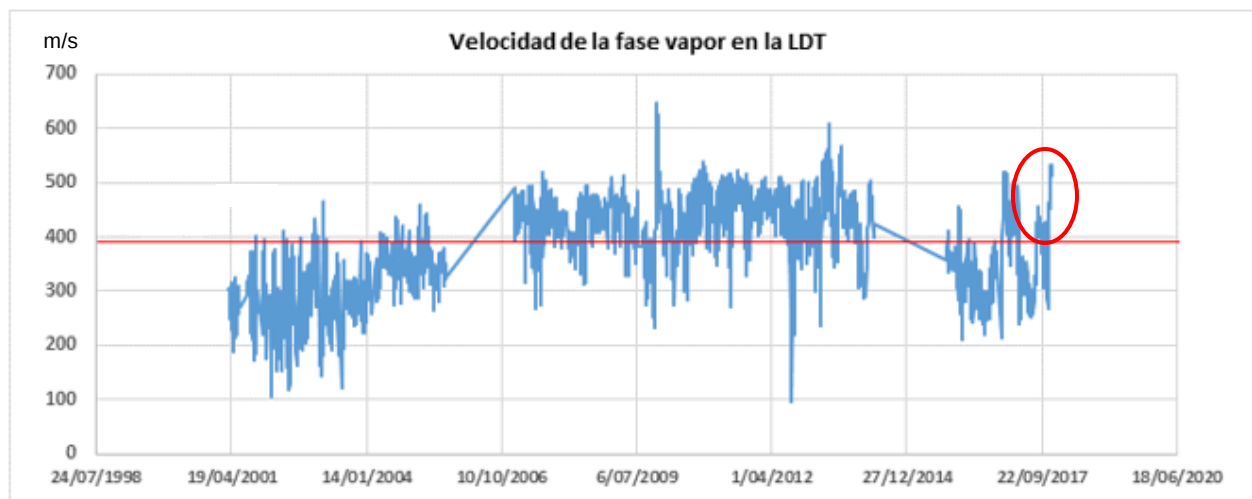


Figura 8. Velocidad fase vapor en línea de transferencia a T-2103. Adaptado de Ecopetrol S.A. (2017). Informe Técnico Condición T2103 (Calidad de Gasóleos a FCCs). Barrancabermeja.

Al observar los datos proporcionados por el departamento, se pudo comprobar que el aumento de carga a la T-2103 por encima de aproximadamente 24,000 bpd, conllevó a una mayor vaporización del crudo reducido en la línea de transferencia entre el horno y la torre de destilación, situación que pudo influir en la disminución de la capacidad de separación Líquido-Vapor en la zona flash mediante el separador ciclónico y así repercutir en la generación del arrastre de componentes pesados hacia las corrientes de los gasóleos (ver Figura 8). En los años anteriores, a pesar de tener velocidades de vaporización semejantes a este caso, no hubo problemas de calidad de los gasóleos en este aspecto, probablemente por las mejores características de los crudos alimentados en dicha época.

Además, en la Figura 9, se presentan los valores del reflujo caliente utilizado para mejorar la rectificación en la zona de lavado junto con los valores de carga de crudo reducido y contenido de asfaltenos en los gasóleos de la torre T-2103. Este reflujo aumentó hasta valores de aproximadamente 3,600 bpd desde que la carga a la unidad superó los 24,000 bpd.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Es importante entonces resaltar, que debido a la mayor vaporización en la línea de transferencia y la zona flash, el reflujo caliente dejó de cumplir su función porque se comenzó a vaporizar al salir de las boquillas de distribución, disminuyendo la cantidad de líquido que pasa por el lecho de lavado y permitiendo que las gotas de asfaltenos arrastradas por el vapor contaminaran los gasóleos extraídos de las secciones superiores a la zona de lavado.

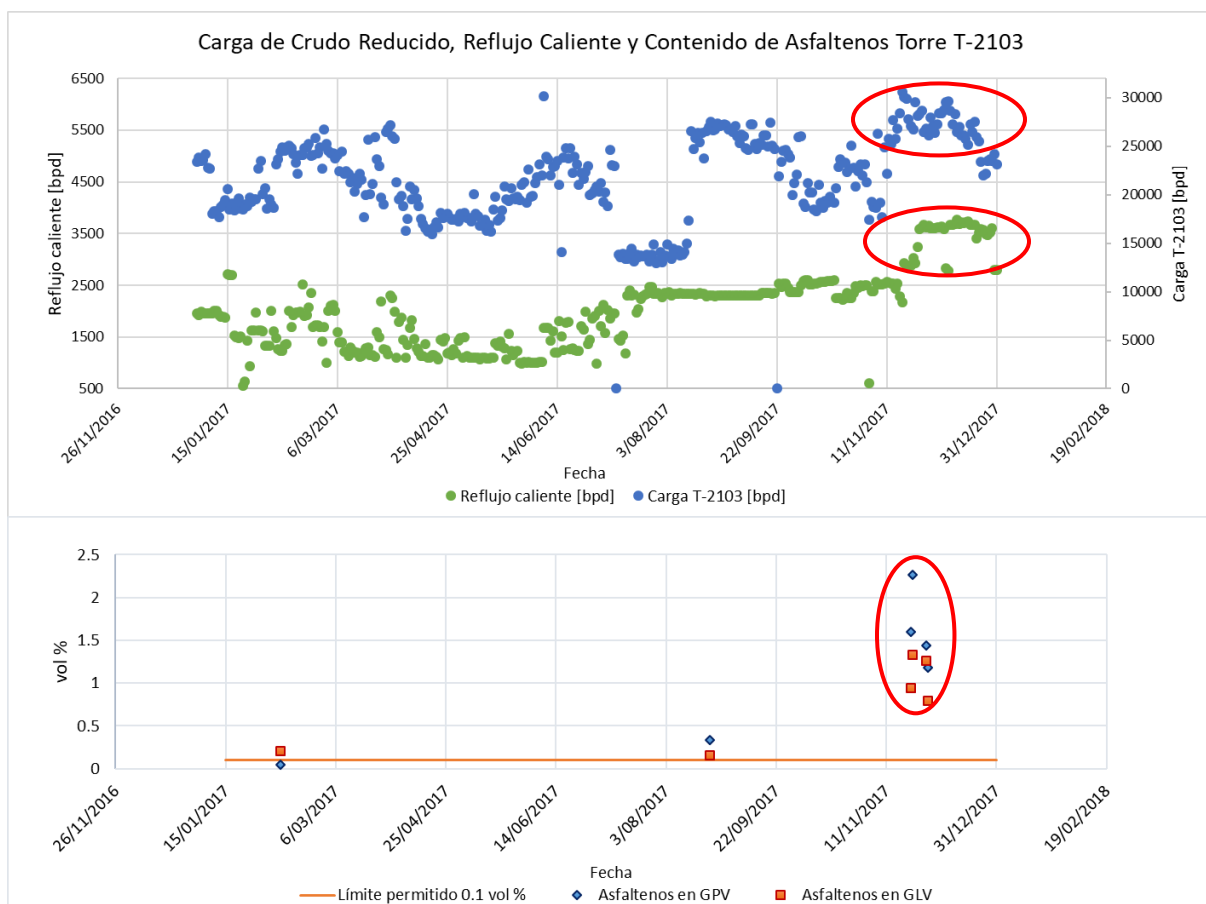


Figura 9. Carga a T-2103, Reflujo Caliente y Contenido de Asfaltenos. Adaptado de Ecopetrol S.A. (2017). Informe Técnico Condición T2103 (Calidad de Gasóleos a FCCs). Barrancabermeja.

Al integrar los diferentes análisis que se realizaron, desde la simulación y datos reales de operación de la T-2103, es posible afirmar que el aumento de insolubles en n-heptano en las corrientes de gasóleo, se debe efectivamente al aumento en la carga de crudo reducido. En consecuencia, es necesario ajustar el flujo de alimentación a la columna y mantener una

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

temperatura adecuada a la salida del horno de precalentamiento, de manera que se garantice la calidad de estos productos, y cumplir con las exigencias en la refinería de Barrancabermeja.

6. Conclusiones

La simulación de una columna de destilación de crudo al vacío como la T-2103 permite obtener resultados semejantes a los datos reales de operación, además, proporciona las herramientas necesarias para el análisis de propiedades fisicoquímicas, condición hidráulica de columna y llevar a cabo pruebas con el fin de predecir el comportamiento operacional cuando se ajustan algunas de las variables del proceso.

No fue posible comprobar el efecto de diferentes empaques en el arrastre de asfaltenos mediante la simulación de la torre T-2103 en el simulador de uso comercial Aspen Hysys V10 ®, sin embargo, es válido afirmar que los empaques utilizados en las distintas zonas de la columna mejoran el contacto líquido-vapor, incrementan la superficie de interfase para la transferencia de masa y favorecen la rectificación.

La carga de crudo reducido a la T-2103 no debe superar los 24,000 bpd de crudo reducido, debido a que valores superiores generan mayor vaporización en la línea de transferencia entre en horno H-2102 y la columna, conllevando al arrastre de componentes pesados en las corrientes de producto y disminuyendo la efectividad del reflujo caliente en la sección de lavado de la torre, situación que afecta la calidad de los productos e incumple los requisitos exigidos en la refinería.

7. Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio técnico y económico para cambiar los anillos Pall utilizados en las secciones empacadas de la torre, por anillos IMTP® de la familia INTALOX® en la próxima parada general de la Unidad de Procesamiento de Crudo U-2100 en el año 2021, pues estos nuevos empaques ofrecen mejores condiciones de contacto líquido-vapor y favorecen el proceso de rectificación en las diferentes secciones de la torre para obtener gasóleos con la calidad exigida en la refinería.

Se recomienda no superar el valor de diseño de la carga a la T-2103 (24,000 bpd) para evitar la contaminación de los productos de la torre con componentes pesados y disminuir los requerimientos energéticos en el horno de precalentamiento.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Referencias Bibliográficas

- Alayon, M. (2004). Asfaltenos - Ocurrencia y floculación. En M. Alayon, Asfaltenos - Ocurrencia y floculación. Mérida: Laboratorio FIRP, 3-4.
- Arce, E. (1995). La simulación como herramienta de desarrollo en la Ingeniería Química. Educación Química., 1, 174-178.
- Benitez, L. A., Gutiérrez, J. P., Ruiz, L. A., Tarifa, E. E., & Erdmann, E. Simulación dinámica del proceso de ajuste del punto de rocío en plantas de acondicionamiento de gas natural, 4-5.
- Chaves, I. D. G., López, J. R. G., Zapata, J. L. G., Robayo, A. L., & Niño, G. R. (2016). Process Analysis and Simulation in Chemical Engineering. Springer.
- Ecopetrol S.A. (2008). Manual de Descripción del Proceso de la Unidad. Barrancabermeja: Grupo de Excelencia Operacional
- Ecopetrol S.A.. (2014). Ecopetrol-Nuestra Historia. Recuperado de <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/acerca-de-ecopetrol/nuestra-historia>
- Ecopetrol S.A.. (2014). Ecopetrol-Refinería de Barrancabermeja. Recuperado de <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/es/ecopetrol-web/nuestra-empresa/quienes-somos/lo-que-hacemos/refinacion/complejo-barrancabermeja>
- Ecopetrol S.A.. (2017). Informe Técnico Condición T2103 (Calidad de Gasóleos a FCCs). Barrancabermeja.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

- Gary J.H., Handwerk G.E. (2005). Crude Distillation. En Petroleum Refining: Technology and Economics (pp. 71-95). CRC press, Taylor & Francis Group.
- Gonçalves, M. L. A. (2002). Estudo do comportamento térmico de asfaltenos de um petróleo brasileiro (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Kellner, M. I., Madachy, R. J., & Raffo, D. M. (1999). Software process simulation modeling: why? what? how? Journal of Systems and Software, 46(2-3), 91-105.
- Koch-Glitsch®. (2003). Intalox Packed Tower Systems. KGIMPT-1. U.S.A.
- Koch-Glitsch®. (2015). Metal Random Packing. U.S.A.
- Mullins, O. C. (2011). The asphaltenes. Annual review of analytical chemistry, 4, 393-418.
- PDVSA. (1994). Manual De Diseño Del Proceso. Torres de Destilación Empacadas.
- Sotelo, D. S. (2002). Beneficios del proceso de hidrotratamientos de gasóleos de carga a FCC. Revista del Centro de Investigación de la Universidad la Salle, 5(17/18), 37-37.
- Vanus, J., Martinek, R., Bilik, P., Zidek, J., & Machac, J. (2015). Energy management strategies in intelligent office building using PI system. En Proceedings of the 8th international scientific symposium on electrical power engineering, Elektroenergetika (pp. 416-419).
- Vega, J., Ale Ruiz, L., Martínez, J., Erdmann, E.(2015). Diseño del proceso de una torre de vacío: Ventajas de la simulación. Universidad de Cuenca. Facultad de Ciencias Químicas. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas, 12, 30-37
- Watkins, R. (1973). Vacuum Tower. En Petroleum Refinery Distillation. (pp. 57-75). Gulf Publishing, U.S.A.

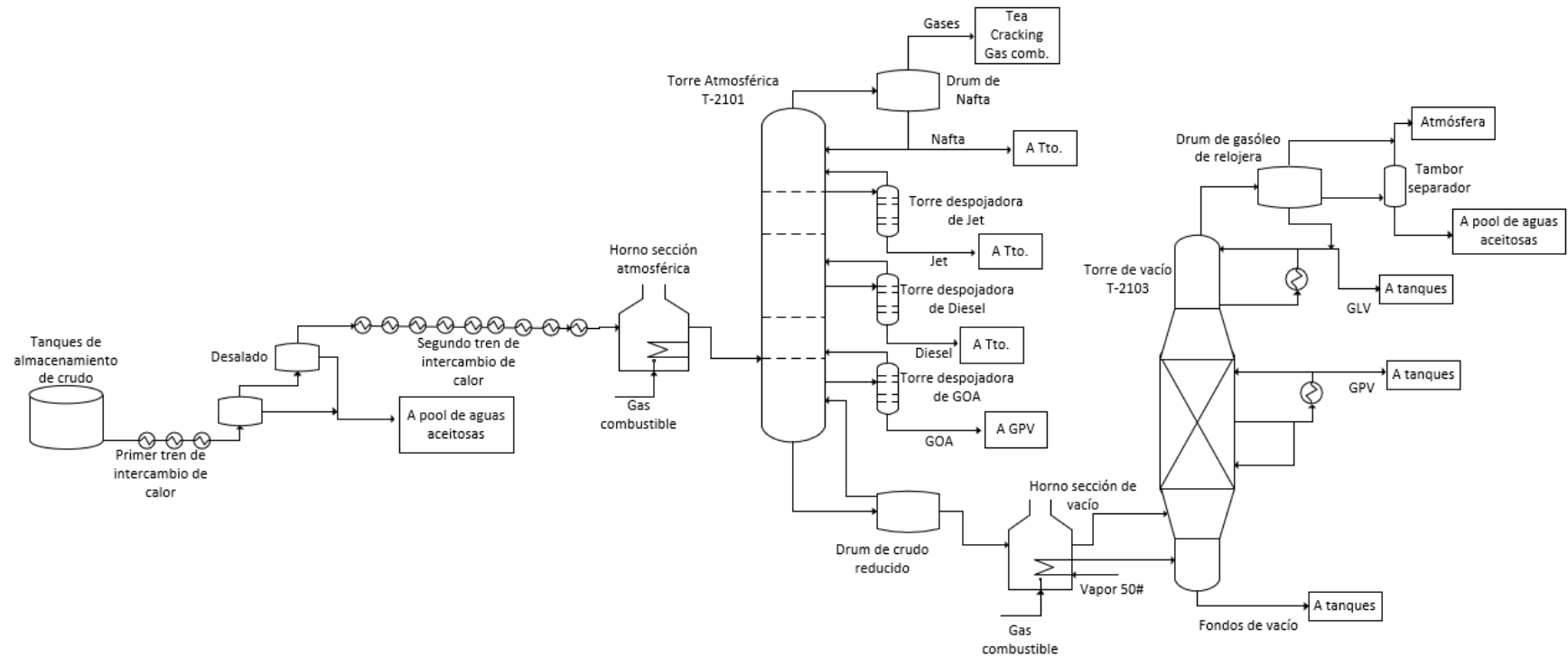
CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Wooley, R. J., & Putsche, V. (1996). Development of an Aspen Plus physical property database for biofuels components (No. NREL/TP-425-20685). National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States)

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Apéndices

Apéndice A. PFD Unidad U-2100

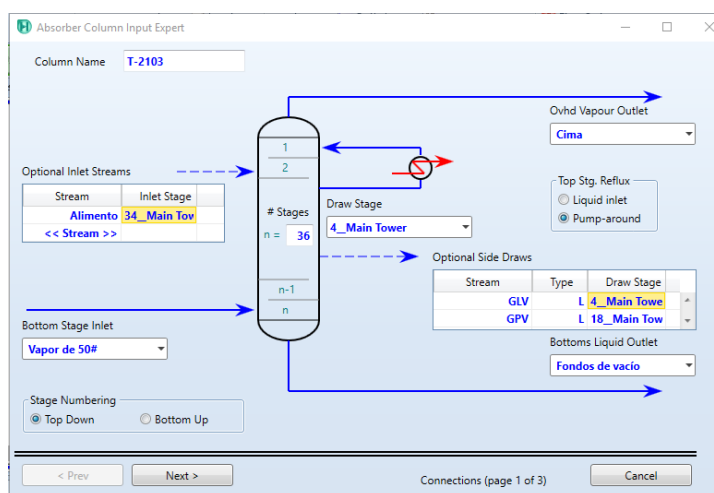


CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

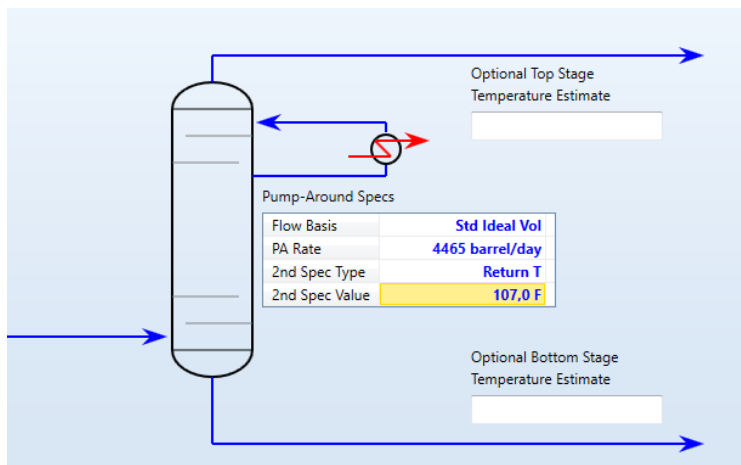
Apéndice B. Propiedades principales y normas para la caracterización de los crudos alimentados a la U-2100

Propiedad	Norma
Destilación TBP	ASTM D-2892
Densidad API	ASTM D-287
Azufre wt. %	ASTM D-4294
Viscosidad cinemática	ASTM D-445
Asfaltenos wt. %	ASTM D-3279
Agua y sedimentos	ASTM D-4007
Metales	ASTM D-5863
Carbón Conradson	ASTMD-189

Apéndice C. Conexiones T-2103 en Aspen Hysys ®

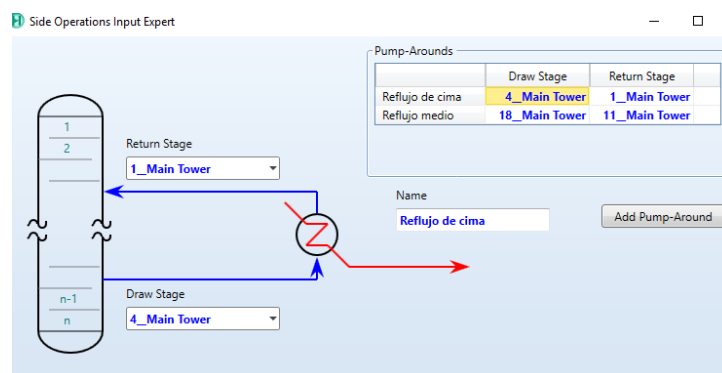


Apéndice D. Especificaciones de Pump Around de GLV



CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Apéndice E. Pump Around de GPV



Apéndice F. Datasheet de la torre T-2103.

TIPIEL SA	PROJECT AMPLIACION CAPACIDAD PROC. CRUDO							
	CLIENT ECOPETROL - BARRANCABERNEJA							
	CONTRACT UNIT	TYPE OF DOCUMENT & PROJECT	ACCOUNT CLASS	REV	SHEET			
105200	SP059004		2	1	2			

ITEM T - 2103 - VACUUM TOWER

- The new design of heat transfer zones should use Glitsch Grid / Ring Combination beds for light and heavy vacuum gas oil zones. If possible, the packing type should be similar to that used in item T-253 and T-2003 (2" Ballast rings).

Existing Glitsch Grid type C shall be reused in combined beds for light and heavy gasoil sections and in single bed for wash oil zone as follows :
 - LVGO section : bed of Glitsch Ballast plus rings # 2, complete with hold-down grid, 1133 mm deep. The total height of the combined bed will be 1727 mm (material SS-316L).
 - HVGO section : Bed of Glitsch Ballast plus rings # 2, complete with hold-down grid, 693 mm deep. The total height of the combined bed will be 1575 mm (material SS-316 L).
- Internals design should be optimized in order to minimize the pressure drop in packed sections.
- Glitsch shall check the performance of existing distributor header, spray nozzles and collectors for new conditions given in data sheets. Glitsch shall supply all those parts of the distribution system that are found not suitable for the design operating conditions.
- Allowable pressure drop for distribution system: 20 PSI.
- All internals should be SS - 316L.
- Actual distribution of materials and nozzles is shown on drawings 2082-4, 20824-5 and 20824-6 by ET Bignier Schmidt - Laurent.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

TIPIEL SA	PROJECT AMPLIACION CAPACIDAD PROC. CRUDO					
	CLIENT ECOPETROL - BARRANCABERMEJA					
CONTRACT UNIT		TYPE OF DOCUMENT & PROGRESSIVE		ACCOUNT CLASS	REV	SHEET
105200		SP059004		2	2	2

7.- The materials of design actually are :

- Shell : Base material A-285 Gr. C+ integrally cladding of 5/64" thickness in material A-263 type 410 S with 0.08 C (max.)
- Ellipsoidal heads : Material base A-285 Gr. C+ integrally cladding of 5/64" thickness in material A-263 type 410 S with 0.08%C. (máx.)
- For relocated nozzles the materials to use preferably are :

Nozzles : Base material A-106 GRB- + cladding in A-264 type 316 L with 0.03% C. máx.)

Flanges : Base material A-181 GR. I + cladding in A-264 type 316 L with 0.03% C (máx.)

Welding : electrodes E-7010 for the root pass + E-7018 for fillings to cladding with shell. E-309 for the pass firts between SS 316L and carbon steel and E-316 L for union SS 316 LSS 410S. The welds should be inspected by penetrant liquids method.

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

TIPIEL SA		PROJECT: EMPLACEMENT CAPACIDAD PROCESAMIENTO CRUDO			
DATA SHEET		CLIENT: ECOMETROL - CIB			
TOWER PACKINGS FOR HEAT TRANSFER		CONTRACT	UNIT	TOWERS	REVISION
		103200	3P	057001	1
TOWER ITEM		COLUMN 1	COLUMN 2	T-2103	
SERVICE		VACUUM DIST.	VACUUM DIST.	VACUUM DIST.	
TOWER SECTION		LIGHT VACUUM	LIGHT VACUUM	HEAVY VACUUM	
		GAS OIL	GAS OIL	GAS OIL	
PROCESS DATA		(1)	(2)	(3)	
LIQUID		H.C. + STEAM	H.C. + STEAM	H.C. + STEAM	
VAPOR IN	DESIGN RATE lb/hr	50912	51941	150076	
	DENSITY AT O.T. lb/ft ³	0.00408	0.0040	0.01015	
	OPERATING TEMP. °F	490	492	649	
	MOL. WEIGHT	124.06	124.01	283.47	
VAPOR OUT	DESIGN RATE lb/hr	4701	5920	44311	
	DENSITY AT O.T. lb/ft ³	0.00066	0.00066	0.00297	
	OPERATING TEMP. °F	135	135	420	
	MOL. WEIGHT	18.09	18.08	122.40	
INTERNAL LIQ. IN DESIGN RATE lb/hr		-	-	-	
	SPEC. GRAVITY AT 60°F	-	-	-	
	DENSITY AT O.T. lb/ft ³	-	-	-	
	OPERATING TEMP. °F	-	-	-	
INTERNAL LIQ. OUT DESIGN RATE lb/hr		150184 (2)	196529	52103 (5)	
	SPEC. GRAVITY AT 60°F	0.931	0.931	0.918	
	DENSITY AT O.T. lb/ft ³	6.77	4.10	5.45	
	OPERATING TEMP. °F	348	290	314	
EXTERNAL LIQUID PUMPAROUND					
	DESIGN RATE lb/hr	84315	145913	395048	
	SPEC. GRAVITY AT 60°F	0.931	0.931	0.918	
	DENSITY AT I.T. lb/ft ³	7.45	4.79	6.57	
	INLET TEMP. °F	125	118	420	
OPERATING PRESSURE mm Hg		12/13 (3)	12/13 (3)	19/21 (1)	
MIN. / MAX. RATE %		60/110 (1)	-	60/110	
SULFUR % WT.		1.6	1.6	1.23	
DUTY - MBTU/hr.		9.40	12.03	20.22	
MECHANICAL DATA					
TOWER DIAMETER ft.		7.5	7.5	10.0	
PACKING TYPE		GRID/RING COMBINAT.	GRID/RING COMBINAT.	GRID/RING COMBINAT.	
PACKING HEIGHT - TOTAL in		1727 mm	1727 mm	1578 mm	
PACKING MATERIAL		35-316 L	35-316 L	35-316 L	
- GRID/RING HEIGHTS		a) 594mm/1153mm	a) 594mm/1153mm	a) 882mm/1535mm	
NOTES: (1) THE DESIGN SHOULD GUARANTEE THE OPERATION FOR PROCESS DATA GIVEN AND MAX. 1.4 MM H ₂ O.					
(2) INCLUDES TOP FLOW (84315 lb/hr) AND LIQD FLOW (202222 lb/hr)					
(3) ALLOWABLE PRESSURE DROP, 9 mm Hg. ALLOWABLE PRESSURE DROP 200					
LIFTING LIFT, SYSTEM, 15 PSI (4) ALLOWABLE PRESSURE 10.315 mm Hg					
(5) INCLUDES STEAM (100000 lb/hr) AND FLOW (100000 lb/hr) AND					
HOT LIQUID TO WASH OIL (33600 lb/hr)					
M/R No. 0590.01					
1. ISSUED FOR ORDER		4/10/81			
2. CHECKED FOR DESIGN		4/10/81			
DATE		DATE	BY	APPROV.	DATE

(6) Enabling grid bed to be reused.

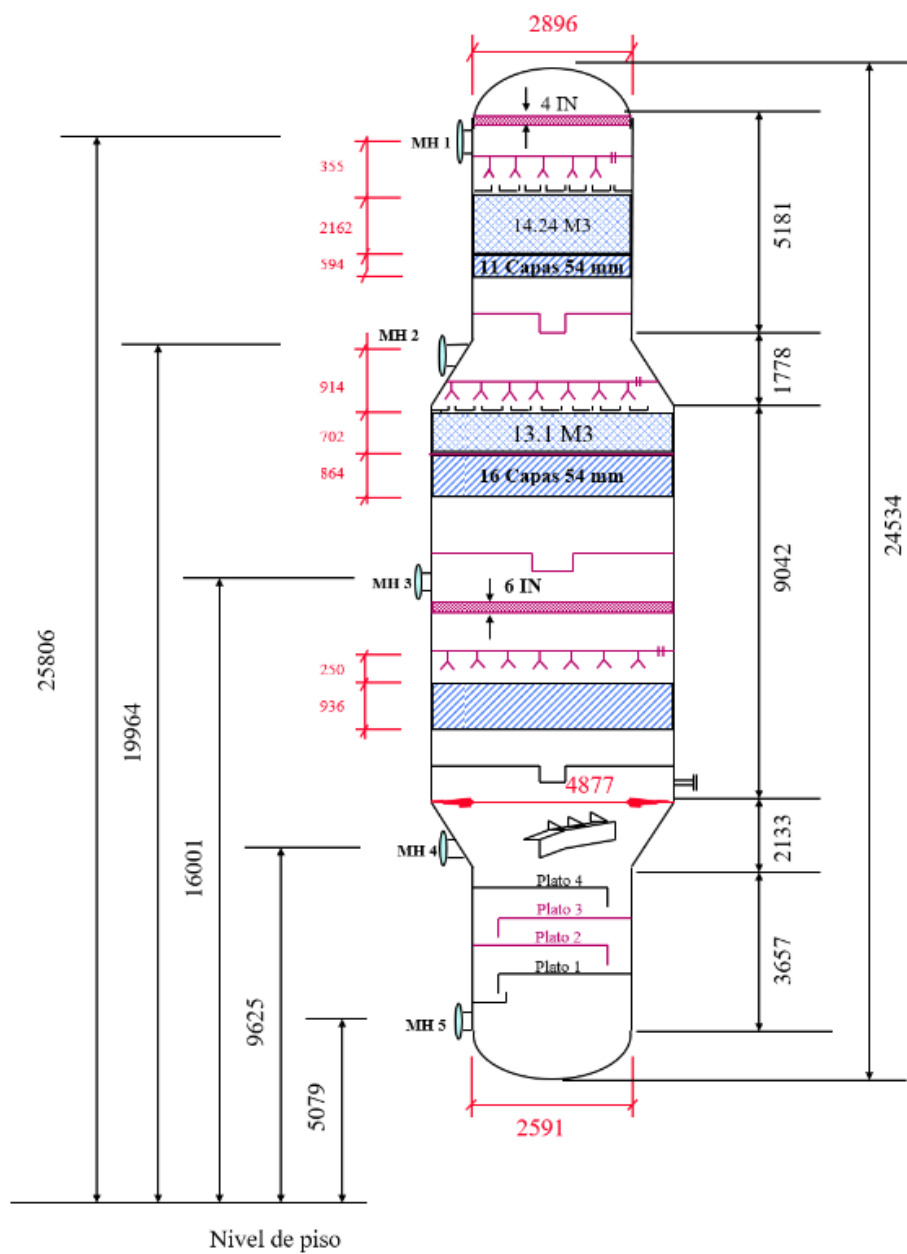
CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

TIPIEL SA				MONTAFUJACION CAPACIDAD PROCESAMIENTO CR-100			
DATA SHEET				CLIENT: ECOPETROL - CIB			
TOWER PACKINGS FOR HEAT TRANSFER				CONTRACT NO. 105200 UNIT 52 TOWER 05 HEIGHT 200'-1 DIA. 14'-3			
TOWER ITEM		T-2103					
SERVICE		VACUUM DIST.					
TOWER SECTION		WASH ZONE					
PROCESS DATA							
FLUID		H.C. + STEAM					
VAPOR IN		DESIGN RATE lb/hr	16912				
		DENSITY AT O.T. lb/ft ³	0.0159				
		OPERATING TEMP. °F	691				
		MOL. WEIGHT	230.62				
VAPOR OUT		DESIGN RATE lb/hr	190036				
		DENSITY AT O.T. lb/ft ³	0.01015				
		OPERATING TEMP. °F	649				
		MOL. WEIGHT	288.42				
INTERNAL LIQ. IN DESIGN RATE lb/hr		-					
		SPEC. GRAVITY AT 60°F	-				
		DENSITY AT O.T. lb/gal	-				
		OPERATING TEMP. °F	-				
INTERNAL LIQ. OUT DESIGN RATE lb/hr		10961 (1)					
		SPEC. GRAVITY AT 60°F	0.948				
		DENSITY AT O.T. lb/gal	6.46				
		OPERATING TEMP. °F	649				
EXTERNAL LIQUID PUMPAROUND							
		DESIGN RATE lb/hr	30683 (2)				
		SPEC. GRAVITY AT 60°F	0.918				
		DENSITY AT I.T. lb/gal	6.95				
		INLET TEMP. °F	559				
OPERATIVE PRESSURE MM Hg		25/28 (3)					
MIN. / MAX. RATE %		60/100					
SULPHUR % wt.		2.0					
DUTY - MBTU/hr.		-					
MECHANICAL DATA							
TOWER DIAMETER ft.		14.0					
PACKING TYPE		SLITCH GEOTEC					
PACKING HEIGHT in		(A) 937 mm.					
PACKING MATERIAL		SS-316 L					
NOTES: (1) RECYCLE FLOWING INTO FLASH DRUM							
(2) NOT USED FOR WASHING							
(3) ALLOWABLE PRESSURE DROP: 3 MM HG							
(4) Existing grid bed to be reused							
MVR No. 0590.01							
1 ISSUED FOR ORDER 041081 0 ISSUED FOR INQUIRY 0222/02							
REV	DESCRIPTION	DATE	BY	APPD	REV	DESCRIPTION	DATE

Fuente: (Ecopetrol S.A.)

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

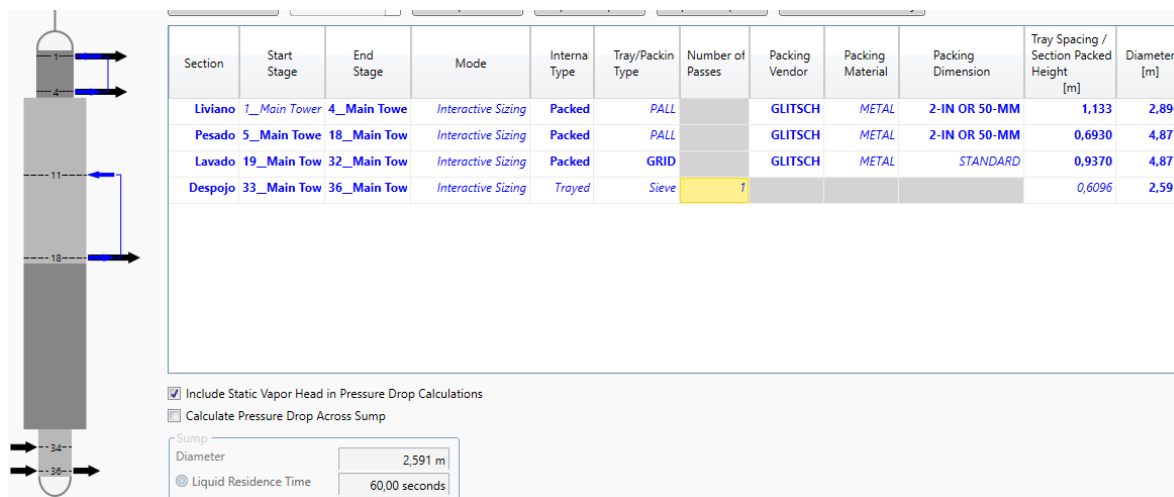
Apéndice G. Dimensiones de T-2103 en [mm] y distribución de internos.



Fuente: (Ecopetrol S.A.)

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Apéndice H. Configuración de internos T-2103 en Aspen Hysys ®



Section	Start Stage	End Stage	Mode	Internal Type	Tray/Packin Type	Number of Passes	Packing Vendor	Packing Material	Packing Dimension	Tray Spacing / Section Packed Height [m]	Diameter [m]
Liviano	1_Main Tower	4_Main Towe	Interactive Sizing	Packed	PALL		GLITSCH	METAL	2-IN OR 50-MM	1,133	2,896
Pesado	5_Main Towe	18_Main Tow	Interactive Sizing	Packed	PALL		GLITSCH	METAL	2-IN OR 50-MM	0,6930	4,877
Lavado	19_Main Tow	32_Main Tow	Interactive Sizing	Packed	GRID		GLITSCH	METAL	STANDARD	0,9370	4,877
Despojo	33_Main Tow	36_Main Tow	Interactive Sizing	Trayed	Sieve	1				0,6096	2,591

☒ Include Static Vapor Head in Pressure Drop Calculations
☐ Calculate Pressure Drop Across Sump

Sump
 Diameter: 2,591 m
 Liquid Residence Time: 60,00 seconds

Apéndice I. Especificaciones Anillos Pall. Rasching ®



Size	5/8" x 0.01"	1" x 0.02"	1" x 0.024"	1.5" x 0.024"	2" x 0.03"	3" x 0.05"
Geometric Surface Area (ft ² /ft ³)	110	66	66	41	32	24
Pieces (number/ft)	6,800	1,445	1,445	411	178	45
Void Space (%)	95	95	95	96	96	96
Bulk Density (lb _m /ft ³)*	24	24	29	19	20	19

Fuente: (Raschig USA, Inc.)

CONTENIDO DE ASFALTENOS EN GASÓLEOS DE REFINERÍA

Apéndice J. Empaques metálicos para torres empacadas PDVSA

Empaque	Tamaño nominal, plg	Características			Inundación		Carga	
		N _p , 1/ft ³	a _p , ft ² / ft ³	ε, ft ³ / ft ²	C _{1,FI}	C _{2,FI}	C _{1,Lo}	C _{2,Lo}
Empaques Desordenados Metálicos								
Anillos Pall	2	176.8	34.3	0.951	1.580		2.725	
	1.4	552.7	47.9	0.946	1.679		2.629	
	1	1345.1	65.5	0.942	2.083		2.627	
	5/8	6490.9	112.3	0.933	2.081		2.550	
Anillos Hiflow	2	141.6	28.1	0.977	1.626		2.702	
	1	1130.3	60.5	0.962	2.177		2.918	
Anillos Bialecki	2	177.8	36.9	0.966	1.896	1.627	2.916	3.616
	1.4	514.7	47.2	0.965	1.885	1.883	2.753	3.850
	1.0	1472.5	68.6	0.945	1.856	1.782	2.521	3.412
CMR	1.5	1720.1	53.3	0.974	1.841		2.697	
	1.0	4487.3	70.9	0.971	1.996		2.703	
Anillos Rashing	5/8	15686	103.6	0.951				
	5/8	10838	177.5	0.917				

Fuente: (Petróleos de Venezuela S.A.)

Apéndice K. Especificaciones empaques Koch-Glitsch®

FLEXIRING® Packing Size							High Strength
Nominal Size	%	1	1½	2	3½	2	
mm	16	25	38	50	90	50	
inch	⅝	1	1½	2	3½	2	
Void Fraction	%	93	96	97	98	98	98
Bulk Weight*	kg/m³	535	325	208	198	135	141
	lb/ft³	33.4	20.3	13.0	12.4	8.4	8.8

* for stainless steel with standard material thickness

HY-PAK® Packing Size				
Nominal Size	1	1.5	2	3
mm	30	45	60	90
inch	1.18	1.75	2.37	3.5
Void Fraction	%	97	98	98
Bulk Weight*	kg/m³	262	180	161
	lb/ft³	16.4	11.2	10.0

* for stainless steel with standard material thickness

IMTP® Packing Size						
Nominal Size	15	25	40	50	60	70
mm	15	25	40	50	60	70
inch	⅝	1	1½	2	2⅝	2⅞
Void Fraction	%	96	97	98	98	98
Bulk Weight*	kg/m³	283	224	153	166	137
	lb/ft³	17.7	14.0	9.6	10.4	8.6

* for stainless steel with standard material thickness

Fuente: (Koch-Glitsch, LP.)