

DISEÑO DE UNA PLANTA DE COQUIZACIÓN RETARDADA PARA PROCESAR RESIDUOS DE PETRÓLEO

Design Of A Delayed Coking Plant For Petroleum Residue Processing

¹Diana Sigcha, ¹Hugo Solís*, ¹Andrés de la Rosa.

¹Universidad Central del Ecuador

¹Facultad de Ingeniería Química, Universidad Central de Ecuador,
Ciudad Universitaria- Calle Ritter & Calle Bolivia, Quito, Ecuador.

*hfsolis@uce.edu.ec Telf.: (593) 9 95980354

R esumen

Simulación y diseño de una planta de coquización retardada para el tratamiento de los residuos con grado API de 6,5 provenientes de dos unidades de viscorreducción de la Refinería Esmeraldas con el fin de obtener hidrocarburos de mayor valor agregado tales como: GLP, naftas y gasóleos.

Se determinaron las principales propiedades fisicoquímicas de los residuos de las unidades viscorreductoras y se completó la caracterización simulando el fluido en un *software* comercial. Se obtuvieron las condiciones de operación de las unidades de viscorreducción y con esta información se procedió a realizar la simulación y balance de masa de la planta de coquización retardada. Se dimensionaron los equipos y tuberías de la planta utilizando criterios y recomendaciones de diseño establecidos por bibliografía especializada.

Los rendimientos obtenidos de los productos craqueados mediante simulación son: 7,5 % de gases (C4), 9,27 % de naftas, 20,62% de gasóleo liviano (LCGO), 32,02 % de gasóleo pesado (HCGO) y 30,59 % de coque.

Palabras claves: coquización retardada, diseño de plantas industriales, craqueo térmico, residuo de petróleo.

A bstract

Simulation and design of a delayed coking plant for the treatment of oil waste with 6.5° API coming from two visbreaking units of Esmeraldas Refinery in order to obtain hydrocarbons of higher added value such as: LPG, naphthas and gas oils.

The main physicochemical properties of visbreaking units' residues were determined by laboratory essays and the characterization of the fluid was simulated using a commercial software. The operating conditions of the visbreaking units were obtained and with this information the simulation and mass balance of the delayed coking plant were carried out. Equipment and pipes of the plant were sized using criteria and design recommendations established by specialized bibliography.

The products' yields obtained by simulation are: 7.5 % of gases (C4-), 9.27 % of naphtha, 20.62% of light gas oil (LCGO), 32.02 % of heavy gas oil (HCGO) and 30.59 % coke.

Keywords: delayed coking, industrial plant design, thermal craking, oil residue

Fecha de recepción: 06-11-2017

Fecha de aceptación: 11-12-2017

INTRODUCCIÓN

La alta demanda de combustibles y el incremento de las reservas de crudo pesado a escala mundial han dado lugar al interés en el procesamiento de los fondos del barril de crudo, usando varios procesos de conversión, entre estos la coquización retardada (1).

El proceso de coquización retardada fue desarrollado para minimizar los rendimientos de los combustibles residuales, asfaltos y alquitranes mediante craqueo térmico (2).

Refinería Esmeraldas procesa 110 000 bpd de crudo, donde 31 500 bpd de fondos de vacío son tratados en las unidades viscorreductoras para producir asfalto y fuel oil, recuperando máximo un 10 % de hidrocarburos livianos. La implementación de este tipo de plantas de coquización recupera un 70 % de hidrocarburos livianos y 30 % de carbón o coque (1). La alternativa de coquización propone valorizar el fondo de viscorreductora además de obtener

beneficios operativos y económicos para las refinerías (ver figura 1).

Entre las diferentes tecnologías diseñadas para la coquización de residuos de petróleo se encuentran: la coquización de lecho fluido (*fluid flexing coking*) y la coquización retardada (*delayed coker*). Este último proceso es el más extendido y utilizado en el mundo, tanto por su flexibilidad para la utilización de diferentes residuos y selección de las variables de operación, como por el elevado rendimiento y calidad de los productos finales (naftas, gasóleos, gases y coque). Este proceso resulta ser también el más rentable económicamente (3).

Una unidad de coquización retardada está compuesta básicamente por los siguientes equipos: fraccionadora, horno de calentamiento del residuo, dos o más cámaras de coquizado y una serie de subunidades o equipos auxiliares, como separadores para gasoil ligero/pesado, estabilizadores y compresores, equipos de corte hidráulico a presión y de enfriamiento. (3) (ver figura 1).

Por su alto contenido de azufre, los productos líquidos obtenidos deben sufrir tratamiento con hidrógeno antes de mezclarse con las correspondientes fracciones de petróleo y ser utilizados en los diferentes procesos de refinación para la mejora de sus características (4).

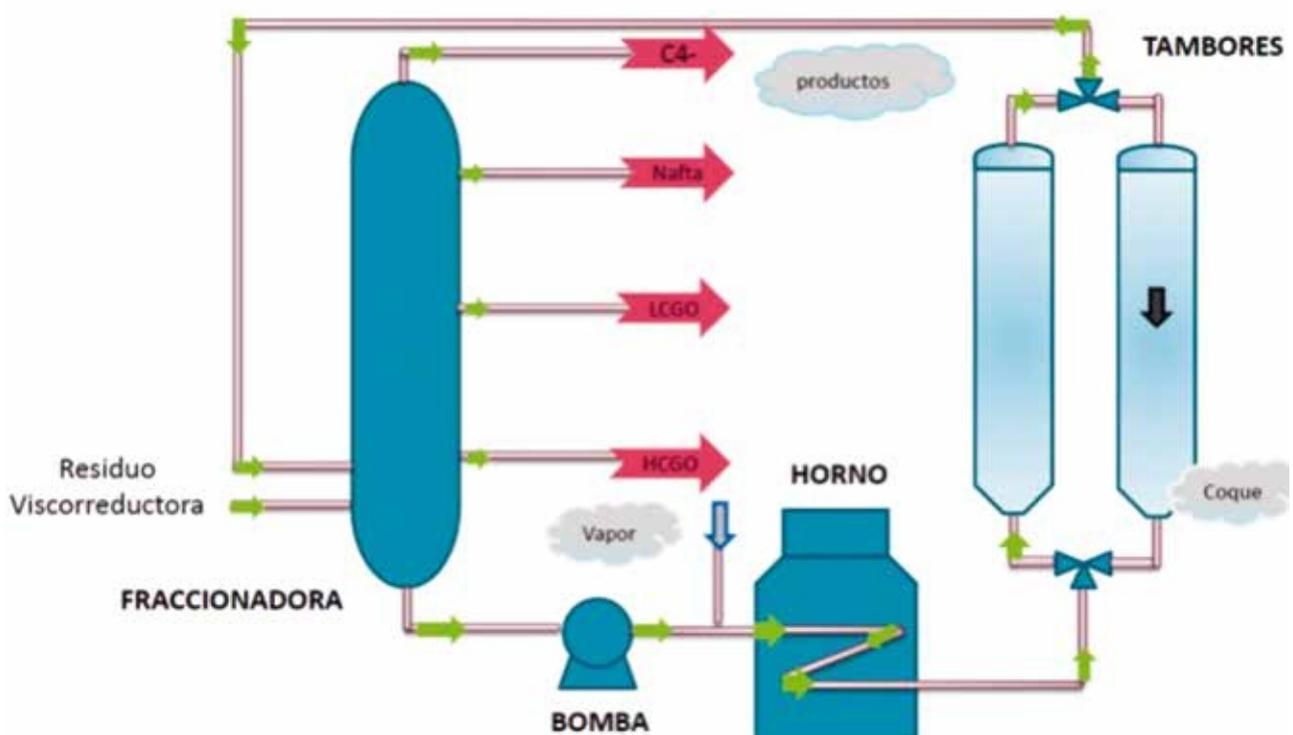


Figura 1. Esquema de una Unidad de Coquización Retardada

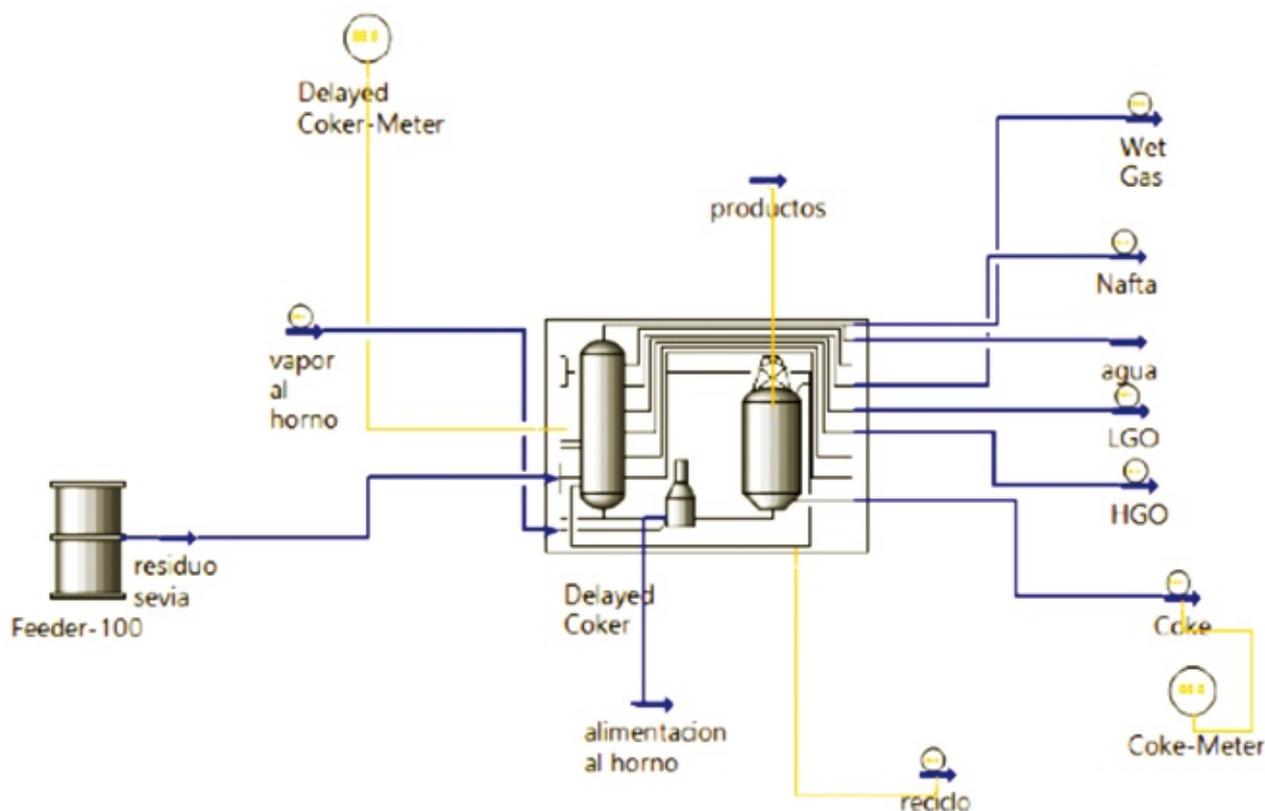


Figura 2. Simulación del proceso de coquización retardada

EXPERIMENTACIÓN

Condiciones de operación del proceso

Dependiendo del tipo de alimentación y los objetivos operativos, hay una variedad de rangos de operación para la producción de coque grado anódico o combustible. Las unidades de coquización son operadas para aumentar el rendimiento de destilados y disminuir la cantidad de coque formado en el reactor (5). Las condiciones típicas de procesamiento para una alimentación pesada, con la obtención de coque de grado combustible se presentan en la tabla 1.

Con la información obtenida y el esquema de flujo establecido (ver figura 1), se procedió a realizar la simulación de procesos utilizando un *software* comercial que permitió establecer los balances de masa y energía, que

Parámetros	Rango
Temperatura de salida del horno, °C	480-515
Presión del tambor, psig	14,5-58
Relación de combinación de alimentación	< 10 %
Ciclo de tambor, horas	18-24

Tabla 1. Condiciones típicas de operación (5)

posteriormente se utilizó para el diseño de los equipos (ver figura 2).

Sistema de precalentamiento de la alimentación

Para precalentar la alimentación que ingresará al fondo de la fraccionadora, se emplea la corriente de gasóleo pesado de *coker* (HCGO), que se obtiene del plato 18 de la fraccionadora simulada a una temperatura de 340 °C, por razones operacionales relacionadas al factor de ensuciamiento, en el intercambiador de calor, la alimentación es enviada por la coraza y, por los tubos, se hace pasar al gasóleo (ver figura 2).

Consideraciones para el diseño del horno

Prácticas de diseño moderno fijan flujos de 400 a 450 lb/s/ft² por cada paso del horno. Los tubos del horno son montados horizontalmente y tienen un diáme-

tro interno aproximadamente de 100 mm con un espesor entre 6 y 12 mm. A los tubos del horno se añade vapor alrededor del 1 % en peso de la alimentación, para aumentar la velocidad del fluido y disminuir los tiempos de residencia evitando la coquización del fluido en su interior. Los materiales empleados en la construcción de los tubos del horno son aleaciones de cromo y las temperaturas de diseño se fijan utilizando la norma API STD 560 (6).

Tambores de coque

Los tambores de coque son operados normalmente en rangos de 25 a 50 psig, o incluso pueden operar a mayores presiones. Los vapores salen por la cabeza del tambor a temperaturas entre 416 y 444 °C (ver figura 1) (7).

El criterio principal de su diseño es la exposición del equipo a ciclos de alta presión además de los cambios bruscos de la temperatura provocados por los compuestos calientes y consecuentemente por su drástico enfriamiento debido a la exposición con agua. Por lo tanto, el tiempo de vida útil de este tipo de reactores es mucho más corto con relación a otros equipos presurizados.

Se recomienda que el material para la construcción de los tambores de coque sea acero inoxidable tipo 410S o 405 para que puedan resistir a la corrosión causada por el alto contenido de azufre en la alimentación (8).

Tiempo del ciclo de operación

El objetivo general es minimizar la duración del ciclo del tambor. El tiempo del ciclo de operación es la cantidad de horas necesarias para enfriar el coque caliente, retirar el coque y calentar el tambor vacío hasta las condiciones adecuadas para la operación de coquización. Para coque de grado combustible, los tiempos de ciclo son entre 16 y 24 horas. Los tambores de coque se llenan

Operación	Tiempo , horas
Coquización	24
Decoquizado	24
Cambio de tambor	0,5
Inyección de vapor de enfriamiento	6
Drenado y extracción de coque	7
Posición normal y pruebas	1,5
Calentamiento	9

Tabla 2. Tiempos recomendados para el ciclo del tambor (9)

durante un ciclo de tiempo, el fraccionamiento opera continuamente (9). En la tabla 2, se detallan las horas empleadas para cada operación en el proceso de coquización.

Fraccionadora

Los productos obtenidos durante el proceso de coquización ingresan a la fraccionadora donde existe una separación en los diferentes platos. Además, la alimentación de residuo de viscorreducción ingresa en el fondo de la torre, la cual provee la altura estática adecuado al sistema de bombeo para que estos fondos de la columna fraccionadora puedan ser enviados al horno. La alimentación ingresa debajo del orificio de entrada de la corriente de vapores craqueados que provienen del tambor de coquización, el tiempo de residencia de la alimentación en el fondo de la fraccionadora está diseñado para menos de 10 minutos con la finalidad de minimizar la formación de coque en esta zona.

Para estimar la presión del fondo de la fraccionadora, se siguen las siguientes consideraciones (10):

- Asumir una presión del tambor de reflujo de arriba de 7 psig (esto se verifica más tarde por un cálculo de punto de burbuja a 40 °C)
- Se asigna al condensador con aire de la cabeza de la fraccionadora una caída de presión de 5 psi.
- Dar una caída de presión de 2 psi a los vapores que fluyen por el condensador (los vapores de cabeza fluyen al lado de la carcasa).
- Se desprecia la caída de presión para los accesorios y las tuberías para el diseño de este equipo.
- La caída de presión por cada plato en la columna se considera de 0,25 psi.

Para calcular la presión del fondo de la columna se emplea la siguiente ecuación:

$$P_{\text{Fondo}} = P_{\text{cabeza}} + \Delta P_{\text{platos}} \quad (1)$$

Un espaciado entre platos recomendado es de 24 in ya sea para el *stripper* o la columna principal (10).

La columna fraccionadora fue simulada mediante un *stripper* para la obtención de gasóleo ligero LCGO, una parte de esta corriente es enviada a enfriar los vapores de hidrocarburos craqueados que salen del tambor de coquización.

Las corrientes de gasóleo pesado y liviano se mezclan y son enviadas hacia la unidad de FCC donde se requiere que la cantidad de carbón conradson (CCR) sea menor que 1 % en peso.

Rendimiento de los productos.

La estimación de los rendimientos de los productos se puede obtener usando correlaciones basadas en el porcentaje en peso de CCR del residuo (2).

$$\% \text{ Gas(C4-)} = 7,8 + 0,144 * (\% \text{ pCCR}) \quad (2)$$

$$\% \text{ Nafta} = 11,29 + 0,343 * (\% \text{ pCCR}) \quad (3)$$

$$\% \text{ Coque} = 1,6 * (\% \text{ pCCR}) \quad (4)$$

$$\% \text{ Gasoleo} = 100 - \% \text{ Gas} - \% \text{ Nafta} - \% \text{ Coque} \quad (5)$$

Parámetro	Magnitud	Unidades
Densidad API (ASTMD-1298)	6,5	°API
Densidad a 15 °C (ASTMD-1298)	1025,4	kg/m ³
Azufre (ASTM D-4294)	2,3	% peso
Carbón Conradson (ASTM D-4530)	23	% peso
Viscosidad dinámica	470	mPa/s a 135 °C
	140	mPa/s a 160 °C

Tabla 3. Resultados de la caracterización físicoquímica del fluido

El gasóleo puede ser dividido en 64,5 % en peso de gasóleo liviano (LCGO) y 35,5 % en peso de gasóleo pesado (HCGO) (2) (ver tabla 4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La alimentación a la unidad de coquización retardada proviene del fondo de las torres de viscorreducción, las cuales trabajan en corte asfalto (T = 360 °C) y corte gasóleo (T = 375 °C), estas diferencias de temperaturas provocan que las propiedades físicoquímicas del residuo de viscorreductora no sean constantes, por lo que se realizó un promedio de los valores obtenidos mediante los ensayos realizados a las diferentes muestras del fluido a caracterizar.

Los promedios de las propiedades del fluido de proceso determinadas se muestran en la tabla 3, datos que fueron ingresados al simulador comercial para caracterizar el residuo de viscorreductora.

Para el diseño se utilizó un flujo másico de 200 ton/h que considera un 20 % de sobre diseño.

Una vez que el proceso de coquización es simulado se obtienen los rendimientos de los productos craqueados además de sus propiedades físicoquímicas (ver tabla 4). Al comparar los rendimientos calculados y simulados existe una diferencia entre estos valores; sin embargo, se aceptan los rendimientos simulados ya que los modelos cinéticos que emplea el simulador relacionan no solo el contenido de carbón conradson (ecuaciones 2, 3, 4 y 5), sino

Producto	Rendimiento % peso		LHV (kcal/kg)	% Azufre	°API	Punto de corte TBP (°C)
	Calculado	Simulado				
Gas (C4-)	11,11	7,49	10 838,2	7,97	-	-
Nafta	19,18	9,27	10 479,0	0,28	54,7	149
LCGO	21,13	20,62	10 079,5	0,91	30,5	154,8 - 381,89
HCGO	11,68	32,02	9 741	1,92	16,24	343
Coque	36,80	30,59	9 915	2,87	-	-

Tabla 4. Rendimientos y propiedades físicoquímicas de los productos craqueados

también las condiciones de operación a las que se da el craqueo del residuo.

A partir de los criterios de diseño recomendados se realizó el dimensionamiento de los equipos principales que intervienen en el proceso utilizando normas y estándares técnicos tales como la ASME y API. Los resultados obtenidos para el diseño de la columna de fraccionamiento, el reactor y el horno se muestran en las tablas 5, 6 y 7. Los valores obtenidos se encuentran dentro del rango establecido por los criterios y recomendaciones de diseño para este tipo de equipos.

CONCLUSIONES

Se diseñó una planta de coquización retardada para Refinería Esmeraldas con una capacidad de tratamiento de 29.540 BPD de residuo proveniente de las unidades viscorreductoras para procesar hidrocarburos pesados de 6,5 °API. Para el cálculo de la presión de diseño de los equipos, se utilizaron las normas ASME sección VIII Div. 3.

La columna fraccionadora diseñada consta de 22 platos, y una zona *flash* en la cual ingresan los productos craqueados y la alimentación fresca; la altura total de la torre, incluyendo la zona *flash*, es de 16,9 m con un diámetro de 5,2 m.

El volumen de cada tambor de coquización será de 2 238,5 m³ con un diámetro de 9 m y una altura de 28,5 m. Las dimensiones se encuentran dentro de rangos disponibles en el mercado (11).

El horno de coque requiere 4,6 ton/h de gas combustible para calentar la carga de 246 °C a 495 °C. Este gas será producido en la planta de coquización retardada y enviado a las unidades de tratamiento y distribución para ser utilizado dentro de la misma planta de coquización retardada. Las dimensiones calculadas del horno están dentro de los valores recomendados por la norma API STD 560.

	Sección 1	Sección 2
Diámetro (m)	5,2	4
Altura	9,1	4,3
Área (m ²)	21,1	12,3
Número de platos	22	
Temperatura de diseño (°C)	438	
Presión de diseño (psia)	82	
Altura de la zona flash (m)	3,5	

Tabla 5. Diseño de columna de fraccionamiento

Volumen del reactor, m ³	2 238,5
Diámetro, m	9,5
Altura, m	28,5
Presión de diseño, kg/cm ² -g	5,4
Temperatura de Diseño, °C	450
Material del reactor	Acero inoxidable 410S

Tabla 6. Diseño del reactor de Coque

Calor requerido, kW	47 103,5
Eficiencia %	83
Combustible	Gas combustible
LHV, kJ/kg	45 120
Flujo de combustible t/h	4,6
Flujo de aire, t/h	18,7
Altura de la zona de radiación, m	10
Profundidad de la zona de radiación, m	12,3
Ancho de la zona de radiación, m	6,7
Número de tubos en las paredes	64
Número de tubos de escudo	35
Longitud de los tubos, m	12
Caída de presión, kg/cm ²	12

Tabla 1. Diseño de horno

Los rendimientos de los productos craqueados son: 7,5% de gases (C4-), 9,27 % de naftas, 20,62 % de gasóleo liviano (LCGO), 32,02 % de gasóleo pesado (HCGO) y 30,59 % de coque por lo que implementar una planta de coquización retardada recupera un 70 % de componentes livianos con mayor valor económico que el residuo de viscorreductora (1).

El consumo de vapor de alta presión para el proceso de coquización retardada en el horno de coque requerirá de 2 ton/h, este será abastecido desde la unidad de utilidades a 350 °C y 600 psig.

R referencias

1. Sawarkar A., Pandit A., Samant S., Joshi J. Petroleum Residue Upgrading via Delayed Coking. *The Can J Chem Eng.* 2007; 85: 1-24
2. Gary J., Handwerk G. *Petroleum Refining.* 4.^a ed. Nueva York: Marcel Dekker; 2001.
3. Kraus R (dir). *Petróleo y gas natural.* En: *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo.* Barcelona: Chantal Dufresne; 1998. Tomo 3.
4. Romero E. *Carbonización de residuos de petróleo, mecanismo y control [tesis doctoral].* Alicante: Universidad de Alicante; 1990.
5. Ancheyta J. *Modeling of Processes and Reactors for Upgrading of Heavy Petroleum.* 2.^a ed. Boca Ratón (FL): CRC Press; 2013.
6. Ellis P, Paul C. *Delayed Coking Fundamentals.* Nueva York: Great Lakes Carbon Corporation 1998.
7. Kaes G. *Refinery Process Modeling.* 1.^a ed. Georgia: Athens Printing Company; 2011.
8. Pieper C, Shockley L, Stewart C. *Coke Drum Design.* Chicago Bridge & Iron Company; 1999.
9. Fahim M, Asahhaf T, Elkilani A. *Fundamentals of Petroleum Refining.* Oxford: Elsevier; 2010.
10. Jones D, Pujado P. *Handbook of Petroleum Processing.* Berlín: Springer; 2006.
11. Aumuller P. *Delayed Coker Drum Craking.* 13th Annual IPEIA Conference; 2009 Feb 11-13; Edmonton: Universidad de Alberta; 2009.
12. ASME Section VIII Div. 3; *Boiler and Pressure Vessel Code,* ASME, USA. 2015.
13. API STD 560; *Fired Heaters for General Refinery Service,* API, USA. 2016.