

Escalamiento del reactor del proceso de coquización retardada

Delayed coking reactor scale – down

Mayorga, José ^{1*}; Chávez, Rafael¹; Mayorga, Omar ¹; Delgado-Linares, José ¹; Sánchez, Rafael ²
Delgado-Linares, Gregorio ²

¹Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes
Mérida, Venezuela.

²Instituto de Tecnología Venezolana del Petróleo, S.A. INTEVEP
Petróleos de Venezuela, S.A. PDVSA, Los Teques, Venezuela

*jmayorga@ula.ve

Resumen

En este trabajo, se realizó el escalamiento de un tambor de Coquización Retardada desde la escala industrial a la escala piloto. Se desarrolló un protocolo de cálculo para el escalamiento y dimensionamiento del reactor, basado en los conceptos de similitud del teorema Π de Vaschy y Buckingham (método de Vaschy - Buckingham). Utilizando los números de Froude, Reynolds, Strouhal y la relación adimensional L/d , se escalaron la velocidad de ascenso de los vapores en el tambor, la longitud del tambor y su diámetro. Los cálculos para realizar el escalamiento tomaron como referencia las propiedades del residuo atmosférico (343°C+) de un crudo extrapesado venezolano. De igual forma, se tomaron como referencia los datos de tambores en operación a escala comercial. El reactor obtenido posee una longitud de 1,33 m, un diámetro de 0,16 m y una velocidad de ascenso de los vapores de 0,116 m/s cuyo error relativo es menor a 1%. Finalmente, se obtuvo un reactor a escala piloto a partir del escalamiento de las variables de interés para este trabajo y además se demostró que a través del método de Vaschy – Buckingham es posible escalar y dimensionar un reactor a escala piloto tomando como referencia equipos a escala industrial.

Palabras clave: Escalamiento, coquización retardada, coque, adimensional, mejoramiento.

Abstract

This work aims at scaling – down a Delayed Coking drum from industrial to pilot scale. A calculation protocol was developed for scaling and dimensioning the reactor, based on the similarity principle of Vaschy-Buckingham Π theorem (Vaschy-Buckingham method). Using the numbers of Froude, Reynolds, Strouhal and the dimensionless L/d relation, the vapor linear ascent velocity, length and diameter of the drum was scaled-down. The properties of an atmospheric residue (343°C+) of an extra – heavy Venezuelan crude oil were taken as reference for the scaling calculations as well as data of drums at commercial scale. In reference to the pilot scale reactor, a vapor linear ascent velocity of 0.116 m/s was obtained, with 1.33 m of drum length and 0.16 m diameter, which represent values with a relative error minor to 1% with respect to the industrial variables scaled. Finally, a pilot scale reactor was obtained by scaling the variables of interest for this work, and also, it has been shown that Vaschy – Buckingham method make possible scaling and dimensioning a pilot scale reactor taking industrial scale data as reference.

Key words: Scaling, delayed coking, coke, dimensionless, upgrading.

1 Introducción

El petróleo representa la principal fuente de energía primaria en el mundo, seguido por el carbón y el gas natural (OPEC, 2013). El crudo puede ser clasificado según su gravedad API en: condensado ($\geq 43^\circ\text{API}$) liviano ($42 - 30^\circ\text{API}$), mediano ($29 - 24^\circ\text{API}$), pesado ($23 - 11^\circ\text{API}$) y extrapesado ($\leq 10^\circ\text{API}$). Esta característica es uno de los elementos que define su valor comercial. Entre ellos, los de

mayor gravedad API tienen valor comercial más alto. Venezuela, posee 297.735 millones de barriles (MMBbls) de reservas probadas extraíbles de petróleo las cuales representan el 18% aproximadamente del total de las reservas del mundo (PDVSA, 2012; BP, 2013). Del total de las reservas venezolanas, el 87% se encuentra en la zona denominada Faja Petrolífera del Orinoco (FPO) al sur del país. Las reservas de petróleo ubicadas en la FPO están compuestas por 3.935 MMBbls de petróleo pesado y 254.874 MMBbls de petróleo

extrapesado (PDVSA, 2012). Lo anterior ubica a Venezuela como el país con las mayores reservas de crudo extrapesado en el mundo.

Los crudos pesados (CP) y extrapesados (XP) poseen bajo valor comercial debido a que sus propiedades físico-químicas exigen procesos de mucha severidad para transformarlos en productos con mayor valor comercial, lo cual trae como consecuencia que se incrementen los costos de inversión y operación cuando esos crudos son manejados en superficie. Para transformar o mejorar las características de los CP/XP, ya sea en subsuelo o en superficie, se deben combinar procesos de separación y de conversión que permitan obtener productos con especificación comercial. En el caso en el que lo único que se desea es mejorar el CP o XP, el o los procesos de conversión constituyen el corazón del mejoramiento. Los procesos de conversión se pueden categorizar según su severidad y según su principio de operación.

De acuerdo a la severidad, pueden clasificarse en procesos de conversión profunda, moderada o baja. Normalmente, la conversión profunda convierte por lo menos el 70% de la fracción 500°C+ del crudo, la conversión moderada se encuentra en el rango de entre 30 – 50% y la conversión baja es menor del 30%. Cuando el proceso convierte entre 50 a 70% se podría hablar de un proceso de conversión moderada – alta. Según el principio de operación, las tecnologías de conversión se pueden clasificar en procesos con rechazo de carbono y procesos sin rechazo de carbono o adición de hidrógeno. Para que un proceso sea considerado como mejoramiento, debe añadir hidrógeno o rechazar carbono mediante reacciones químicas en alguna de las fracciones del crudo, independientemente de si se realiza en superficie o subsuelo.

La Coquización Retardada (CR) es un proceso térmico de conversión profunda con rechazo de carbono cuyo objetivo es transformar el producto de fondo de la destilación atmosférica o al vacío en fracciones más livianas, mediante la activación de las reacciones de rompimiento de los enlaces carbono-carbono o craqueo de los compuestos presentes en esa fracción. Así, la CR busca maximizar la producción de hidrocarburos líquidos de mayor valor comercial, potencialmente obtenibles del crudo original (Gary y col., 2007).

El desarrollo y optimización de tecnologías de procesamiento del crudo y sus fracciones requieren de un gran número de horas de experimentación, cuya ejecución, en la mayoría de los casos, se lleva a cabo en diferentes escalas, con el objetivo de estudiar por separado y detalladamente los diversos fenómenos que controlan el comportamiento del proceso. Una de las escalas que aporta mayor información durante el desarrollo de una tecnología es la escala piloto. Por ello, las tecnologías de mayor impacto en el ámbito petrolero, toman esa escala como base para realizar los estudios de visualización de la nueva tecnología a escala industrial.

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar una metodología para escalar los tambores comerciales del proceso

de CR, con el fin de obtener las dimensiones de un reactor a escala piloto que arroje resultados experimentales escalables desde la escala piloto a la comercial, lo cual representa una herramienta que permite dar respuesta a posibles contingencias operacionales a menor costo y grado de incertidumbre. Asimismo, se logra un aporte relevante al estudio de la Ingeniería Química en un campo como el escalamiento, cuya información disponible resulta escasa. Debe mencionarse también, la importancia del escalamiento en la formación académica de los nuevos ingenieros, para fomentarles el interés en el desarrollo de nuevas tecnologías.

2 Marco Teórico

2.1 Coquización Retardada

A escala industrial, la CR es un proceso que requiere de dos reactores o tambores para funcionar de manera continua. Ambos reactores conforman lo que se conoce como un tren. Los equipos más importantes del proceso son un horno para calentar la carga y una columna fraccionadora para separar los productos líquidos y gaseosos formados durante las reacciones. Comúnmente, la carga o alimentación puede ser el residuo de la destilación atmosférica o al vacío que se calienta en el horno a temperaturas de entre 480 y 530°C, con un tiempo de residencia muy bajo para evitar la formación de coque.

Luego, la carga entra al tambor que está en servicio de coquización, el cual puede tardar en llenarse entre 9 y 24 horas. En la tabla 1 se muestra el ciclo típico de un tambor que dura en servicio 24 horas. La presión de operación varía entre 1,02 y 10,2 atmósferas, dependiendo del caso. Los productos de la reacción son gas, líquido y coque (sólido). Cuando el coque alcanza un nivel predeterminado dentro del tambor que se encuentra en servicio, el flujo se desvía al otro tambor, permitiendo la continuidad de la operación.

Al terminar de enfriar el coque que se encuentra dentro del tambor, se retira el sólido por métodos hidráulicos, durante la fase llamada decoquización. Un par típico de tambores tiene una capacidad de alimentación en torno a los 35 000 barriles por día (BPD). El producto sólido se recupera y almacena. Los vapores que salen por el tope de los tambores se envían a la columna fraccionadora y se separan en gas de coque, nafta de coque y gasóleos livianos y pesados de coque (Foster Wheeler, 2008).

Tabla 1. Ciclo típico de CR (Gary et al., 2007)

Operación		Tiempo (h)
Coquificación	Llenado	24
Decoquificación	Cambio de tambores e inyección de vapor	3
	Enfriamiento	3
	Corte de coque y drenaje de tambores	7
	Calentamiento, Acondicionamiento	9
	Tiempo muerto, contingencia	2
Total		48

El rendimiento de los productos en el proceso de CR depende del tipo de alimentación y de las condiciones de operación de la unidad. Las principales variables de operación son: temperatura, presión, relación de recirculación dentro de la fraccionadora y tiempo de residencia. Para estimar el rendimiento de los productos del proceso de CR, se puede emplear las siguientes ecuaciones (Meyers 2004):

Para porcentaje en peso:

$$\%Coque = 1,6 \cdot (\%CCR) \quad (1)$$

$$\%Gas(C_4) = 7,8 + 0,144 \cdot (\%CCR) \quad (2)$$

$$\%Gasoil = 100 - \%Coque - \%Gas(C_4) - \%Gasolina \quad (3)$$

$\%CCR$: % peso de carbono Conradson de la alimentación

2.2 Coque de petróleo

El coque de petróleo es un sólido carbonoso, resultante de la pirólisis aplicada a la alimentación de la CR. Durante la pirólisis, se genera un líquido cristalino denominado mesofase que está constituido principalmente por carbono no grafitico. El coque de petróleo se puede clasificar según su uso o calidad y según su morfología. De acuerdo a su uso se clasifica en:

- coque de petróleo de combustión;
- coque de petróleo regular o grado ánodo;
- coque de petróleo de aguja;
- coque de petróleo de recarburación o metalúrgico.

Según su morfología en:

- coque perdigón;
- coque esponja;
- coque aguja.

La obtención de uno u otro tipo es función, en parte, de las variables de operación, pero principalmente de las características de la carga. El valor comercial del coque depende principalmente de su estructura cristalina, composición elemental y molturabilidad. El coque tipo aguja se obtiene a partir de cargas con alto contenido de compuestos aromáticos y se emplea para la fabricación de electrodos de grafito, ya que tiene una textura fibrosa con largas agujas unidireccionales lo cual, junto a otras propiedades, le confiere alto valor comercial. El coque tipo esponja, generalmente proviene de alimentaciones con elevado contenido de resinas y asfaltenos y es un producto cuyo valor comercial es menor al tipo aguja (generalmente se utiliza en la industria del aluminio como coque grado ánodo y como combustible). El coque perdigón es el de menor calidad y valor comercial, formado por pequeñas esferas aglomeradas en una matriz de esponja o esferas de perdigones de mayor tamaño.

En algunos casos, el proceso de CR es selectivo a un tipo de coque en específico, por lo que las variables operacionales y la alimentación se ajustan de acuerdo al caso (Menéndez 1994, Foster 2008).

2.3 Análisis Dimensional

El análisis dimensional es una herramienta conceptual utilizada en la Física, la Química y la Ingeniería para entender fenómenos que involucran la combinación de diferentes cantidades físicas. Además, se emplea para verificar relaciones entre distintas escalas y cálculos, así como para construir hipótesis sobre fenómenos físicos, químicos o biológicos que puedan ser verificables experimentalmente. Por ejemplo, se puede utilizar para evaluar si una ecuación es dimensionalmente homogénea.

La base fundamental del análisis dimensional es el Teorema Π de Vaschy – Buckingham que relaciona las variables que pueden influir en el fenómeno que se estudia. Establece las ecuaciones dimensionales de las variables involucradas en el volumen de control o sistema, así como también sus constantes dimensionales o adimensionales. Si existen variables con las mismas dimensiones, se escoge una de ellas y las restantes se dividen entre esta, obteniéndose grupos adimensionales que se añaden al total obtenido resultando en ecuaciones denominadas “factores de forma”.

Cada variable se expresa en función de las magnitudes físicas que la constituyen, elevando cada magnitud a un exponente que debe ser calculado. Seguidamente, se forma la matriz compuesta por los exponentes de las magnitudes correspondientes a las distintas variables y constantes adimensionales. Así, para el caso de las n variables $q_1, q_2, \dots, q_n$ y la constante g_c , la matriz que se obtiene se muestra en la Fig.1.

A partir de esta matriz, se obtiene la característica k , cuyo valor representa el menor número de variables y constantes que no forman un grupo adimensional. Posteriormente, se consiguen los i grupos adimensionales, cada uno formado

$$\begin{matrix} L \\ M \\ F \\ T \\ \theta \end{matrix} \left\{ \begin{matrix} \text{Matriz de los exponentes de las magnitudes para las} \\ \text{variables y constantes dimensionales} \end{matrix} \right\}$$

L=longitud, M=masa, F=fuerza, T=temperatura, θ =tiempo.

Fig. 1. Matriz para las variables y constantes dimensionales

por $k+1$ factores q , siendo cada factor una variable o constante adimensional, elevados a exponentes que deben determinarse. De todos estos factores adimensionales, hay k que son las variables que hacen que la matriz sea de característica k , además de cada una de las $n-k$ variables restantes con exponente igual a uno. Las ecuaciones Π se pueden escribir de la siguiente forma:

$$\Pi_1 = q_1^{a_1} \cdot q_2^{a_2} \cdot \dots \cdot q_k^{a_k} \cdot q_{k+1} \quad (4)$$

$$\Pi_2 = q_1^{b_1} \cdot q_2^{b_2} \cdot \dots \cdot q_k^{b_k} \cdot q_{k+2} \quad (5)$$

$$\Pi_i = q_1^{c_1} \cdot q_2^{c_2} \cdot \dots \cdot q_k^{c_k} \cdot q_{k+3} \quad (6)$$

En este conjunto de ecuaciones, las magnitudes $q_1, q_2, \dots, q_k$, son las variables y constantes que contienen entre todas, la totalidad de magnitudes fundamentales del sistema de unidades seleccionado que se muestran en la Fig. 1. El conjunto de exponentes $a_1, b_1, \dots, p_1; a_2, b_2, \dots, p_2$; etc., deben ser tales que los grupos $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_i$ carezcan de dimensiones. Como los factores Π no tienen dimensiones, se colocan las magnitudes de cada variable en los distintos grupos adimensionales, reuniendo cada magnitud que queda elevada a un exponente o combinación de exponentes de las variables en las que aparece esta magnitud. Esta combinación de exponentes se iguala a cero, obteniéndose para cada factor Π un sistema de k ecuaciones y k incógnitas. Al resolverse el sistema de ecuaciones, se obtiene los exponentes de las variables que forman cada grupo adimensional. Con cada factor Π y los factores de forma, es posible obtener la siguiente función de números adimensionales:

$$f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_i) = 0 \quad (7)$$

En algunas ocasiones, no hay necesidad de formar la matriz de los exponentes y determinar su característica, pues por simple observación, puede encontrarse el número mínimo de variables y constantes que no forman grupo adimensional (Ibarz y col., 2005)

2.4 Números Adimensionales

Un número adimensional es aquel que no tiene unidades físicas que lo especifiquen (Tabla 2), y por lo tanto, es un número puro. Además, se definen como productos o cocientes de cantidades que tienen unidades, de tal forma que todas estas se simplifican. Los números adimensionales característicos de un sistema pueden obtenerse mediante el análisis dimensional y el teorema Π de Vaschy – Buckingham (Johnstone y col., 1957, Zlokarnik 2002).

Tabla 2. Números adimensionales (Johnstone 1957, Zlokarnik 2002)

Número Adimensional		Similitud aportada
Reynolds (Re)	$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}$	Mecánica
Euler (Eu)	$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot v^2}$	Estática y Dinámica
Strouhal (St)	$St = \frac{L/v}{t}$	Química
Relación de forma	L/d	Geométrica
Froude (Fr)	$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$	Estática y Dinámica
Péclet (Pe)	$Pe = \frac{L \cdot v}{D}$	Mecánica
Damköhler (Da)	--	Química

ρ = densidad; μ = viscosidad; v =velocidad; d =diámetro; L =longitud; ΔP =diferencial de presión; t =tiempo; g =aceleración de la gravedad; D =difusividad másica

2.5 Escalamiento

El escalamiento es un método que desarrolla criterios y reglas de asignación numérica, que determinan las unidades de medida de interés para un estudio en específico con el fin de llevar un proceso o equipo de un tamaño a otro. Escalar un proceso es convertirlo de su escala de investigación (laboratorio o piloto) a escala industrial o viceversa. El paso fundamental del escalamiento consiste en trasladar los datos obtenidos en una experiencia previa a la escala deseada de acuerdo con alguno de los siguientes métodos (Anaya-Durand 2008):

Fenomenológico: Está fundamentado en un razonamiento teórico de tipo microscópico. No involucra consideraciones moleculares y permite hacer estimación en rangos de operación no estudiados experimentalmente.

Empírico: se postula sin bases teóricas y sólo se espera que ajuste la interacción entre los datos en el rango o intervalo de experimentación.

Por similitud: obtenido a partir de un análisis de similitud (ver 2.6), con respecto a analogías físicas de tipo térmico, mecánico, geométrico, químico, etc.

2.6 Principio de Similitud

Los principios de similitud hacen referencia a la relación que existe entre los sistemas físicos y sus dimensiones. La configuración de un sistema físico se caracteriza en general por tres cualidades: tamaño, forma y composición. Estas variables son independientes, por ejemplo, dos objetos pueden ser diferentes en tamaño y, sin embargo, tener la misma forma y composición. Algunos de los principios de similitud son: (Anaya-Durand 2008, Zlokarnik 2002).

Geométrica: dos cuerpos son geoméricamente similares cuando para todo punto en el primer cuerpo existe un punto en el segundo. No es necesario que la relación de escalamiento sea la misma en cada uno de los ejes, lo cual se entiende como similitud geométrica distorsionada.

Estática: cuerpos geoméricamente similares también lo son estáticamente cuando, al estar sujetos a esfuerzos constantes, sus deformaciones relativas son tales que permanecen geoméricamente similares.

Cinemática: sistemas en movimiento geoméricamente similares presentan similitud cinemática cuando partículas correspondientes trazan trayectorias geométricas correspondientes en intervalos de tiempo similares.

Dinámica: sistemas en movimiento con similitud geométrica son dinámicamente similares cuando las relaciones de todas las fuerzas correspondientes son iguales.

Mecánica: comprende las similitudes estática, cinemática y dinámica. Cada una de estas puede considerarse como una extensión del concepto de similitud geométrica en sistemas fijos o en movimiento, sujetos a fuerzas externas o internas.

Térmica: sistemas que presentan similitud geométrica son

térmicamente similares cuando la diferencia de temperatura conserva una relación constante entre ellos y cuando los sistemas, si están en movimiento, son cinemáticamente similares.

Química: sistemas con similaridad geométrica y térmica tienen similaridad química cuando las diferencias correspondientes de concentración mantienen una relación constante entre uno y otro y cuando los sistemas, si están en movimiento, son cinemáticamente similares.

3 Métodos

Se definió como volumen de control el reactor del proceso de CR a escala industrial. Los datos iniciales, fueron las corrientes de entrada y salida de plantas industriales de CR. Luego, se realizaron los balances de masa global y por componente, asociados al volumen de control y los resultados se ingresaron en los simuladores PRO/II® y ASPEN PLUS® para realizar los balances de masa y determinar las propiedades promedio de los vapores en ascenso por el tambor. Los datos de interés a obtener de los simuladores fueron: densidad y viscosidad. De igual forma, se calculó el área de flujo y la velocidad de ascenso lineal de los vapores en el tambor. A partir de los resultados se obtuvo el número de Reynolds (NRe) de cada unidad industrial (Tabla 3). Asimismo, se estudiaron las dimensiones de los reactores de distintas plantas piloto de CR, con el fin de identificar alguna tendencia o patrón en el diseño del reactor.

Tabla 3. Número de Reynolds en unidades industriales

Planta Industrial	Número de Reynolds, NRe
A	515 077
B	663 000
C	928 297
Promedio aritmético	702 125

El escalamiento se realizó mediante el análisis dimensional, tomando como base el principio de similaridad. Los números adimensionales de partida se obtuvieron a partir de los datos a escala industrial y, mediante el desarrollo de un algoritmo de cálculo, se llevaron a la escala piloto. Los números adimensionales requeridos para el dimensionamiento del tambor se calcularon de acuerdo a las propiedades de la carga y la geometría del tambor de coquización. Las propiedades se evaluaron según su nivel de importancia, es decir, se tomaron las propiedades que generan perturbaciones apreciables en las variables del sistema. A los efectos del presente estudio, se seleccionaron las siguientes variables para determinar los números adimensionales:

- Longitud (L).
- Densidad (ρ).
- Velocidad (v).
- Viscosidad (μ).
- Tiempo de residencia (t).
- Diámetro (d).
- Gravedad (g).
- Temperatura (T).

3.1 Bases de diseño

Para definir las bases de diseño, se tomó como referencia las propiedades del residuo atmosférico de un crudo extrapesado venezolano cuyo punto de corte es 343°C+ y contenido de Carbón Conradson (CCR, %p) de 18,1%. Esto se debe a que el diseño debe ser capaz de procesar una amplia gama de alimentaciones con el fin de reproducir la calidad de los productos, independientemente de la carga con la que se trabaje. Asimismo, la velocidad de ascenso de los vapores $V_{p(s)}$ debe estar en el rango [0,076 – 0,15] m/s (Hecks y Onken, 1987) y el factor de forma L/d debe encontrarse en el rango [8,0 – 8,5]. A su vez, el error relativo en el cálculo de la velocidad de ascenso de los vapores, de acuerdo a la metodología mostrada en la Fig. 2, debe ser menor a 5%.

3.2 Algoritmo de cálculo propuesto para el dimensionamiento del tambor

Se desarrolló un procedimiento de cálculo para relacionar los números adimensionales con los parámetros de operación de interés para el estudio (Fig. 2). Inicialmente, se supone la velocidad de ascenso de los vapores $V_{p(s)}$, o la longitud del reactor a escala piloto $L_{p(s)}$. Seguidamente, al obtener la relación entre las velocidades y las longitudes para la escala piloto e industrial, se define la relación adimensional L/d (L: longitud, d: diámetro) a escala piloto como el promedio aritmético de los valores en las plantas piloto conocidas (Tabla 4).

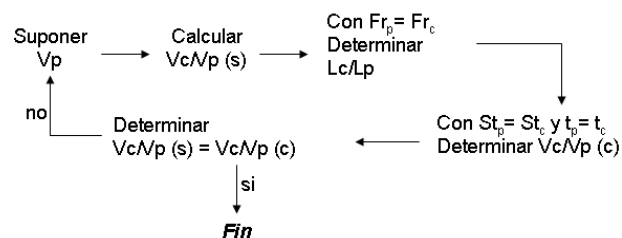


Fig. 2. Procedimiento de cálculo

Tabla 4. Relaciones de forma L/d para Plantas Piloto (Velasco y Rodríguez, 1986)

Planta Piloto	L/d
A	8,00
B	8,00
C	8,45
D	8,49
E	8,49
F	8,44
Promedio aritmético	8,31

Determinadas las velocidades V_c y longitudes L_c en los tambores a escala industrial, se obtiene la velocidad V_p , longitud L_p y el diámetro D_p del reactor a escala piloto. Así, se procede con el cálculo del volumen del reactor piloto (se asume cilíndrico). Con la densidad del coque, se determina la masa para un volumen producido del mismo durante un tiempo determinado. Con las ecuaciones (1), (2) y (3) se obtiene el flujo de carga. Conociendo la viscosidad y la densidad de los vapores dentro del tambor, se puede determinar el caudal volumétrico total de salida. Con el flujo de los vapores de ascenso y el diámetro del tambor, se obtiene el área de flujo y la velocidad de ascenso real dentro del tambor. Luego, se determina el error relativo entre la velocidad calculada y la velocidad inicial y si la diferencia es mayor a 5%, se supone otra velocidad y se repite el procedimiento.

En el algoritmo de cálculo, se utilizaron los números de Strouhal y Froude para determinar la velocidad de ascenso de los vapores y la longitud del reactor a escala piloto. Igualando las relaciones adimensionales entre las velocidades de ambas escalas, se supone una velocidad inicial para el cálculo y además se obtiene la relación entre las longitudes de los tambores en ambas escalas. Este último valor, junto con el cociente Longitud/diámetro L/d, permite obtener las dimensiones del tambor piloto de coquización. Al observar la Tabla 4, la relación de forma para plantas piloto de coquización retardada se encuentra entre 8,0 y 8,5. Para los cálculos, se empleó el promedio aritmético (8,31) de la relación L/d mostrada en dicha tabla. Con todas las variables definidas, es viable la aplicación del método de cálculo para la obtención de las dimensiones del reactor piloto. Partiendo de los algoritmos planteados, se desarrollaron 3 casos de estudio, los cuales se diferencian en la carga al reactor y la variable a calcular (Tabla 5) donde HC es el hidrocarburo. Para los efectos de los cálculos, se fijó un valor del flujo de carga Q_c , el cual, dependiendo de la propuesta, puede representar el total de la alimentación. Por ejemplo, el valor del flujo de carga en la propuesta 1 considera como alimentación solo al HC, Alimentación = Q_c = HC. En la segunda propuesta, los cálculos toman como flujo de carga solo el HC el cual está en presencia de una cantidad de agua Q_c = HC. Esto quiere decir que el total de la alimentación al reactor es mayor que Q_c (Alimentación > Q_c). En el tercer caso, el total de la alimentación es la suma de HC mas agua Q_c =

HC + agua, (Alimentación = Q_c).

4 Resultados y Discusión

En la Tabla 4, se muestran los valores del factor de forma (L/d) de reactores piloto de referencia. A partir de ellos, se calculó el promedio aritmético que fue utilizado para determinar el valor de la relación de forma del nuevo reactor a escala piloto. Para comprobar este valor, se desarrolló un procedimiento de cálculo en el que se fijó el N_{Re} en 1000 y se varió la relación de forma L/d resultando en un valor de 8,55.

Tabla 5. Casos de estudio

Propuesta	Carga al reactor	Variable a calcular	Número de tambores
1	$\frac{Q_c}{HC}$	L y v	1
2	$\frac{Q_c}{HC} + \text{agua}$	L y v	1
3	$\frac{Q_c}{HC + \text{agua}}$	L y v	1

HC: hidrocarburo, L: longitud. v: velocidad de los vapores.

Sin embargo, en el caso de las plantas industriales, se encontró que el L/d varía en un rango más amplio (entre 2,6 y 5) que en el caso de las plantas pilotos (Tabla 6). El promedio aritmético es de 2,86 sin tomar en cuenta la planta D. Sobre la base de lo anterior, se determinó que existe similitud geométrica distorsionada entre las escalas para el proceso en estudio. Por consiguiente se propone un factor de escalamiento $fe=0,34=2,86/8,31$ (Ecuación 8).

$$fe = \frac{L/d_{industrial}}{L/d_{piloto}} \quad (8)$$

Tabla 6. Relaciones de forma para Tambores Industriales

Planta Industrial	L/d
A	2,64
B	2,76
C	3,05
D	5,00
E	2,98
Promedio aritmético con Planta D	3,28
Promedio aritmético sin Planta D	2,86

La fluidodinámica dentro del tambor está directamente relacionada con la velocidad de ascenso de los vapores (Hecks 1987). Para que no ocurra arrastre de los finos de

coque en el reactor piloto, la velocidad de ascenso se debe mantener en el rango $[0,076 - 0,15]$ m/s. Para los cálculos en este estudio, se tomó como valor inicial de la velocidad, el valor medio del rango (0,114 m/s). (Rincón 2005, Rodríguez 1997, Hecks y col., 1987, Ellis y col., 1992). Los resultados de las propuestas se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de las distintas propuestas

Propuesta	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	L/d	Velocidad de Vapores (m/s)	N_{Re}	Error relativo de la V_p (s)
1	133	16	8,31	0,1162	621	0,81
2	100	12	8,33	0,1162	466	0,81
3	122	15	8,13	0,1224	600	4,56

En la Tabla 3, se muestran los valores del número de Reynolds para plantas comerciales. Se puede observar que el flujo de las plantas industriales se encuentra en régimen turbulento, lo cual, al compararlo con el N_{Re} de la Tabla 7, se puede apreciar una diferencia de órdenes de magnitud. Esta discrepancia, podría generar diferencias en los resultados de calidad y rendimientos de productos así como también en la morfología del lecho de coque. Según Siskin y col., (2006), se estima que las condiciones de operación de la unidad comercial pueden favorecer la formación de uno u otro tipo de coque. De acuerdo al autor y en orden de importancia, a continuación se presentan los factores físicos y operacionales que se creen tienen influencia en la morfología del coque resultante:

Alto punto de corte de la carga

Disminución de la relación de recirculación(recirculación de naturaleza aromática)

Alta turbulencia/velocidad en la línea de transferencia hacia los tambores

Alta turbulencia/velocidad en los tambores

Alta temperatura

Baja presión

Al presentarse uno o varios de los factores físicos/operacionales señalados, se espera que la alta turbulencia produzca pequeñas gotas que pueden coquizar antes de aglomerarse, debido a la ausencia de un medio aromático que promueva la formación de la mesofase y que además, evite que las pequeñas gotas coquizadas se peguen entre sí antes de separarse del medio.

Sin embargo, cuando las dimensiones y geometrías de los reactores se obtienen a partir del escalamiento de las variables críticas del proceso en estudio, los resultados del comportamiento del reactor en una u otra escala son reproducibles debido a que los cálculos para diseñar el reactor tomaron en cuenta las relaciones entre las variables de cada

escala. De acuerdo a algunos autores (Johnstone y col., 1957, Zlokarnik 2002, Nauman 2001) los números adimensionales deben ser correspondientes en ambas escalas, o en su defecto poseer algún factor de escalamiento. Sin embargo los N_{Re} observados en las tablas 3 y 7 difieren en ordenes de magnitud, lo cual en concordancia con lo propuesto por Siskin, sugiere que la morfología del lecho de coque a obtener en el reactor experimental será diferente al que se obtiene a escala comercial.

En la Tabla 7 se puede observar que, a excepción del caso 3, los errores relativos de la velocidad de ascenso de los vapores obtenidos mediante la metodología de cálculo mostrada en la Figura 2 son menores a 1%. Esto quiere decir que el método de cálculo propuesto permite obtener aproximaciones de las variables estudiadas con un error menor a 5%. La similitud entre los reactores en ambas escalas se logró mediante el uso de los números adimensionales, cada uno aportando una similaridad distinta de acuerdo a la Tabla 2. Los números de Euler, Péclet y Damköhler no fueron empleados en el escalamiento del reactor. Sin embargo, esto fue compensado con el uso de los números de Froude, Reynolds y Strouhal, respectivamente. La similaridad térmica se logró igualando el calentamiento de la carga (rango de 450 a 550°C) y el perfil de temperaturas de los reactores en ambas escalas.

Estrictamente hablando, es necesario cumplir con cada tipo de similaridad para realizar el escalamiento de cualquier sistema. En este trabajo se cumplen todas las similaridades: geométrica, mecánica (cinemática, estática y dinámica), térmica y química. La geométrica se asegura con la relación de forma L/d, la mecánica con los números de Reynolds, Froude y con la relación entre los números de Strouhal y Froude en el algoritmo desarrollado, la química con el número de Strouhal y la térmica como ya se mencionó.

Debido a que el reactor a escala piloto no solo debe asegurar las similaridades mencionadas, se desarrolló una matriz de selección de alternativas, que toma en cuenta otros criterios (Tabla 8) para escoger la propuesta que mejor se ajuste a los intereses de la investigación.

Para elegir la alternativa más adecuada en el dimensionamiento del tambor, se desarrolló una matriz de selección, que considera una serie de criterios de evaluación de alternativas. A cada criterio se le asignó un puntaje de acuerdo al nivel de importancia en función de los intereses del estudio, y la alternativa que arrojó el mayor puntaje correspondió al reactor más adecuado. Según los criterios, la Propuesta 1 obtuvo el mayor puntaje y correspondió al cálculo de la longitud y la velocidad de ascenso de vapores a partir de la suposición inicial de la velocidad de vapores de la planta piloto, en un tanteo similar al de la Fig. 2. Al definir un valor de la relación de forma L/d, se obtuvo el diámetro y el volumen del reactor. Este parámetro adimensional está dentro de los rangos establecidos en las bases de diseño para el L/d y la velocidad de ascenso de vapores.

Tabla 8. Criterios de selección de alternativas

Criterio
Metodología de Cálculo
Flexibilidad Experimental
Error relativo de la $V_{p(s)}$
Similaridad Geométrica
Similaridad Mecánica
Similaridad Química
Similaridad Térmica
Número de Reynolds
L/d (piloto)

Finalmente, al escoger la Propuesta 1, se obtuvo un reactor a escala piloto con 133 cm de longitud y 16 cm de diámetro, con velocidad lineal de los vapores de ascenso por el reactor de 0,1162 m/s y número de Reynolds de 621. De esta manera, se logró escalar el tambor de coquización retardada a la escala piloto asegurando todas las similitudes entre ambas escalas.

5 Conclusiones

Por medio del teorema Π de Vaschy – Buckingham, se logró desarrollar una metodología que permitió escalar el reactor industrial del proceso de coquización retardada a la escala piloto.

Se determinó que existe similitud geométrica distorsionada entre la escala comercial y la piloto del proceso de coquización retardada. Se propone un factor de escalamiento entre las escalas estudiadas de 0,34.

Se desarrolló una matriz de selección de alternativas, la cual consideró los criterios expuestos en la Tabla 8 y que permitió identificar el reactor más adecuado a los intereses de este trabajo. De las opciones estudiadas, se escogió el reactor de la opción 1, ya que se ajustó mejor a los criterios de selección.

El reactor seleccionado posee las siguientes dimensiones: longitud $L = 133\text{cm}$ y diámetro $d = 16\text{cm}$. Además, cumple con las bases de diseño definidas para este trabajo, Velocidad lineal de ascenso de los vapores $V_{p(s)} = 0,1162\text{ m/s}$, $[0,076 - 0,15]\text{ m/s}$, y factor de forma $L/d = 8,31$ $[8,00 - 8,55]$.

Referencias

- Anaya-Durand A, 2008, Escalamiento: el Arte de la Ingeniería Química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. UNAM, Facultad de Química, Ciudad Universitaria. México. Tecnología, Ciencia, Educación. Año/vol. 23 Número 001.
- BP, 2013, Statistical Review of World Energy 2013, BP plc. England.
- Ellis P, Hardin E, 1992, Pilot Delayed Coker, Light Metals. pp. 609 – 616.
- Ellis P, Hardin E, 1993, How Petroleum Delayed Coke Forms in a Drums. Light Metals. pp. 509 – 515.
- Foster Wheeler Co, 2008, Delayed Coking, Selective Yield

Delayed Coking SYDEC. USA.

Gary J H, Handwerk G E, Kaiser M J, 2007, Petroleum Refining Technology and Economics, Fifth Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA.

Hecks J, Onken U, 1987, Hysteresis effects in suspended solid particles in bubble columns with and without draft tube. Chem. Eng. Sci. Vol. 42, p. 1211.

Ibarz, A, Bárbosa-Cánovas G, 2005, Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. Tecnología de Alimentos. Grupo Mundi-Prensa. Madrid, España.

Jacob R, 1971, Coke quality and how to make it, Hydrocarbon Processing. Vol. 50, No. 9, pp. 132-136.

Johnstone R M, 1957, Pilot Plants, Models and Scale-up Methods in Chemical Engineering, McGraw-Hill. USA.

Menéndez J, 1994, El Coque de Petróleo como Aditivo en la Producción de Coques Metalúrgicos. Universidad de Oviedo. España.

Meyers R, 2004, Handbook of Petroleum Refining Processes, Third Edition. pp. 12.51

Nauman B, 2001, Chemical Reactor Design, Optimization, and Scale-up. McGraw-Hill. New York. USA.

PDVSA, 2012. Informe de gestión anual 2012 (Parte 1). Petróleos de Venezuela S.A. Venezuela.

Rincón G, 2005, Estableciendo Capacidad para Plantas Piloto: coquización retardada. Universidad Simón Bolívar. Venezuela.

Rodríguez-Reinoso F, 1997, Delayed Coking: industrial and laboratory aspects. Carbon, Vol. 36, No. 1. pp. 105 – 116.

Siskin M, Kelemen C P, Brown L D, Aferworki M, 2006, Asphaltene molecular structure and chemical influences on the morphology of coke produced in delayed coking. Energy & Fuels, Vol. 20. pp. 1227 – 1234.

OPEC. http://www.opec.org/opec_web/en/data_graphs/330.htm (consultado en mayo del 2013).

Zlokarnik M, 2002, Scale-up in Chemical Engineering, Wiley-VCH. Federal Republic of Germany.

Recibido: 05 de diciembre de 2013

Revisado: 06 de junio de 2014

Mayorga, José: Ingeniero Químico y MSc. ULA (1978 y 1986). Profesor de la Escuela de Ingeniería Química de la ULA.

Chávez, Rafael: Ing. Químico, ULA (2012). Se desempeña como Ingeniero de Procesos, Poliolefinas Internacionales en Pequiven. Correo electrónico: chavezortegar@gmail.com

Mayorga, Omar: Ing. Químico. ULA (2012). Candidato PhD. Universidad de Duisburg-Essen. Alemania. Correo electrónico: oamv24@gmail.com

Delgado-Linares, Jose G.: Ingeniero Químico, MSc y Doctorado. ULA (2000; 2006 y 2012) Post-doctorado en Colorado School of Mines (EE UU, 2012). Profesor de la Escuela de Ingeniería Química de la ULA. Correo electrónico: josedel@ula.ve

Sánchez, Rafael: Ing. Químico. Universidad Metropolitana (2005). MSc. Refinación, Ingeniería y Gas. IFP (2008). Trabaja en Soporte Técnico e Investigación y Desarrollo PDVSA - Intevep. Correo electrónico: sanchezrhx@pdvsa.com

Delgado, Gregorio: Ing. Químico. ULA (2004). MSc Refinación, Ingeniería y Gas. IFP (2010). Trabaja como Ingeniero de Procesos y Gerente Técnico Alternativo en el Complejo de Plantas Piloto PDVSA - Intevep. Correo electrónico: delgadogu@gmail.com

