



UAZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
ZACATECAS
"Francisco García Salinas"

USCQ



UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS QUÍMICAS

FORMANDO
PROFESIONALES
DE LA QUÍMICAFECHAS
29 al 31 de Agosto 2017

DISEÑO DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN PARA LA SEPARACIÓN DE UNA MEZCLA DE ACEITES USADOS DE MOTOR

García González Juan Manuel, Sigala Valdez Jesús Octavio, Carranza Téllez José, Carranza Concha José, Villegas Martínez Rodrigo Cervando, Conejo Flores Ricardo

Unidad Académica de Ciencias Químicas
Universidad Autónoma de Zacatecas

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es el diseño de una columna de destilación para llevar a cabo la separación de una mezcla de aceites usados de motor, con el fin de contribuir a mejorar el medio ambiente y darle un plus al uso del aceite usado. Este diseño es parte del proyecto "Diseño de una Planta para retirar los contaminantes presentes en el aceite usado de motor para su reutilización como lubricante o combustible", dando el sustento teórico para la construcción del equipo. En este estudio se plantean los modelos matemáticos para un método aproximado (Fenske, Underwood y Guilliland) y un método riguroso (BP de Wang y Henke). El primero se resuelve mediante el software EZSolve y el segundo con el software Whendi y comprobado con el PRO II. La resolución mediante el método corto da como resultado una columna de ocho etapas, lo que se comprueba mediante un análisis de sensibilidad utilizando el simulador PRO II, además de ubicar la etapa cuatro como la de alimentación del aceite de motor. Los resultados que se tienen para el diseño son: Alimentación 5000 l/h, como líquido saturado, salida de destilado de la columna 1605 l/h, espaciamiento entre cada etapa 0.55 m, diámetro y altura de la columna 1.5 m y 6.6 m respectivamente.

INTRODUCCIÓN

En México, los aceites residuales generados representan más del 65% de los aceites lubricantes consumidos. Esto hace que los aceites usados sean uno de los residuos contaminantes más abundantes que se generan actualmente, pudiendo alcanzarse la cifra de 450 millones de litros al año, de los cuales 108 millones corresponden al área metropolitana. Del total generado se recicla 37 millones y otros 13 millones aproximadamente se usan en la elaboración de combustibles técnico ecológicos. Al resto, esto es 400 millones de litros, se les da un uso ambiental inadecuado (Sigala¹, 2015). Una gran cantidad de aceite usado de



FORMANDO
PROFESIONALES
DE LA QUÍMICA

"UN PILAR DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA EN ZACATECAS"



motor se genera anualmente como consecuencia de los cambios de aceite. Generalmente se desecha al medio ambiente o se recicla, pero hay otros usos para este producto. Algunas industrias mezclan aceite usado con otros aceites para producir diferentes tipos de aceites lubricantes. El aceite usado también puede quemarse. Se incendia a temperaturas entre 300 °C y 400 °C, dependiendo de su composición química. El aceite usado se ha empleado como combustible en quemadores de aceite en el hogar, como también en calderas industriales, incineradores municipales y en hornos de cemento rotatorios. También se usa para producir asfalto². En el pasado, el aceite usado de cárter se usó también en caminos de tierra para controlar el polvo. Sin embargo, actualmente la mayoría de los estados limitan tal uso, por la contaminación al medio ambiente. Lo anterior expuesto, invita a reflexionar la forma de mitigar la presencia de aceite usado de motor en el medio ambiente. Dentro de las posibilidades que pueden ser consideradas son; volverlo a utilizar como lubricante, o como combustible para la generación de energía o modificando su estructura química para ser empleado como combustible en motores, etc. Cualquiera de las alternativas expuesta presupone un tratamiento fisicoquímico mediante operaciones unitarias combinadas para retirar todos los componentes nocivos y que puedan contaminar el medio ambiente.

ANTECEDENTES

Este trabajo es parte del proyecto para el Diseño de una Planta para retirar los contaminantes presentes en el aceite usado de motor para su reutilización como lubricante o combustible, dando el sustento teórico para la construcción del equipo.

La primera parte de este proyecto es diseñar la primera operación unitaria que es necesaria para iniciar el proceso, la filtración, debido a que el aceite usado trae material que debe ser retirado de inmediato, como es estopa, lodos, rebabas del motor, coque, etc. Posteriormente a este, se debe centrifugar el aceite usado para retirar las partículas finas, que la filtración no retuvo. La segunda parte es este Proyecto. Por último se contempla el diseño de un intercambiador de calor para los efluentes de la columna de destilación. A la fecha no se ha contemplado la realización de un proceso con reacción química, pero no está descartado.

MARCO TEÓRICO

Es importante para cualquier planteamiento de un problema en ingeniería química que se inicie con un análisis de grados de libertad (N_D), de acuerdo a Kwauk se puede utilizar la siguiente expresión matemática:

$$N_D = N_V - N_E \quad \text{Ec. 1}$$



FORMANDO
PROFESIONALES
DE LA QUÍMICA

"UN PILAR DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA EN ZACATECAS"



Siendo N_V es el número de variables; N_E es el número de ecuaciones.

Mediante el análisis de grados de libertad se puede encontrar cuales son las variables con mayor influencia en el proceso.

Para la resolución del modelo matemático de la separación multicomponente por destilación se tiene dos opciones, un método aproximado (Metodos Cortos) y un Método Riguroso. El método Corto más usual las ecuaciones de Fenske, Underwood y Gilliland (FUG).

La ecuación de Fenske (Ec 2) se usa para determinar el número mínimo de etapas (N_{min}).

$$N_{min} = \frac{\log \left[\left(\frac{x_{i,N+1}}{x_{i,1}} \right) \left(\frac{x_{j,1}}{x_{j,N+1}} \right) \right]}{\log \alpha_{i,j}} \quad \text{Ec 2}$$

Siendo X la composición, i el componente clave ligero, j el componente clave pesado y $\alpha_{i,j}$ la volatilidad relativa promedio.

Con la ecuación de Underwood (Ec 3) se calcula la Relación Mínima de Reflujo (R_m)

$$R_m = \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i X_{i,D}}{\alpha_i - \theta} - 1 \quad \sum_{i=1}^N \frac{\alpha_i X_{i,F}}{\alpha_i - \theta} = 1 - \phi \quad \text{Ec 3}$$

Con la Correlación de Gilliland (Ec 4) se estima el número de etapas necesarias (N) si se quiere alcanzar una separación especificada entre los dos compontes clave lo normal es que la relación de reflujo y el número de platos sean superiores al mínimo anteriormente calculado. La relación de reflujo a aplicar suele ser una consideración de tipo económico y generalmente se escoge una relación R/R_{min} de 1.3, como caso intermedio. Es necesario resaltar que para el correcto uso del método corto es necesario realizar un balance de materia de la columna.

$$X = \frac{R - R_{min}}{R + 1} \quad Y = \frac{N - N_{min}}{N + 1} \quad \text{Ec 4}$$

Para el Método Riguroso (método BP de Wang y Henke) considérese un separador liquido-vapor, continuo y en estado estacionario, con cierto número de etapas dispuestas en cascada en contracorriente. En cada etapa se alcanza el equilibrio entre fases y no hay reacción química. La Figura 1 muestra el esquema en forma general de una etapa de equilibrio j para un separador líquido-vapor, donde las etapas están numeradas de arriba abajo (Henley³, 1999), tomándola como referencia se obtienen las ecuaciones que modelan cualquier columna de destilación.



FORMANDO
 PROFESIONALES
 DE LA QUÍMICA

"UN PILAR DE CIENCIA Y
 TECNOLOGÍA EN ZACATECAS"



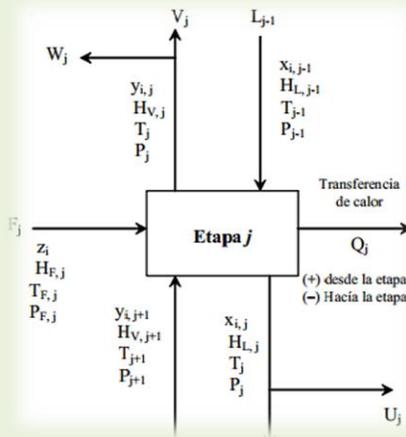
Para el Balance de materia para cada componente

$$M_{ij} = L_{j-1}x_{i,j-1} + V_{j+1}y_{i,j+1} + F_j z_{i,j} - (L_j + U_j)x_{i,j} - (V_j + W_j)y_{i,j} = 0 \quad \text{Ec 5}$$

Considerando las relaciones de equilibrio entre las fases para cada componente (K Es la relación de equilibrio entre fases o constante de equilibrio):

$$E_{i,j} = y_{i,j} - K_{i,j}x_{i,j} = 0 \quad \text{Ec 6}$$

Figura 1



- $X_{i,F}$ = Composición de la alimentación en fracción mol,
- z_i = Composición de alimentación del componente i
- F = Flujo de alimentación
- H = Entalpía
- j = Número de etapa
- $J+1$ = Etapa posterior
- $j-1$ = Etapa anterior
- L = Flujo líquido
- P = Presión
- Q = Calor
- T = Temperatura
- U = Salida lateral de líquido
- V = Flujo vapor
- W = Salida lateral de vapor
- x = Fracción mol de líquido
- y = Fracción mol de vapor

Esquema general de una etapa de equilibrio y nomenclatura empleada.
 [Tomado de: Henley³, 1999, pág. 613]

Para el Balance de energía:

$$H_j = L_{j-1}H_{L,j-1} + V_{j+1}H_{V,j+1} + F_j H_{F,j} - (L_j + U_j)H_{L,j} - (V_j + W_j)H_{V,j} + Q_j = 0 \quad \text{Ec 7}$$



FORMANDO
PROFESIONALES
DE LA QUÍMICA

"UN PILAR DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA EN ZACATECAS"



Para las fracciones molares en el vapor y líquido:

$$(S_y)_j = \sum_{j=1}^c y_{i,j} - 1 = 0 \quad (S_x)_j = \sum_{j=1}^c x_{i,j} - 1 = 0 \quad \text{Ec 8}$$

Es importante hacer mención que el método BP de Wang y Henke, requiere de una serie de ecuaciones auxiliares que a continuación se describe.

Flujo líquido interno:

$$L_j = V_{j+1} + \sum_{m=1}^j (F_m - U_m - W_m) - V_j \quad \text{Ec 9}$$

Fracción mol líquido:

$$(x_{i,j})_{\text{normalizado}} = \frac{x_{i,j}}{\sum_{i=1}^c x_{i,j}} \quad \text{Ec 10}$$

Relación de equilibrio:

$$\sum_{j=1}^c K_{i,j} x_{i,j} - 1 = 0 \quad \text{Ec 11}$$

Calculo de Q_N :

$$Q_N = \sum_{j=1}^N (F_j H_{F,j} - U_j H_{L,j} - W_j H_{v,j}) - \sum_{j=1}^{N-1} (Q_j - V_1 H_{V,j} - L_N H_{L,N}) \quad \text{Ec 12}$$

Calculo de V_j (nueva variable para iterar):

$$V_{j+1} = \frac{\gamma_j - \alpha_j V_j}{\beta_j} \quad \text{Ec 13}$$

Donde:

$$\beta_j = H_{V_{j+1}} - H_{L_j} \quad \text{Ec 14}$$

$$\alpha_j = H_{L_{j-1}} - H_{V_j}$$

**FORMANDO
PROFESIONALES
DE LA QUÍMICA****"UN PILAR DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA EN ZACATECAS"**

$$\gamma_j = \left[\sum_{m=1}^{j-1} (F_m - W_m - U_m) - V_1 \right] (H_{L_j} - H_{L_{j-1}}) + F_j (H_{L_j} - H_{F_j}) + W_j (H_{V_j} - H_{L_j}) + Q_j$$

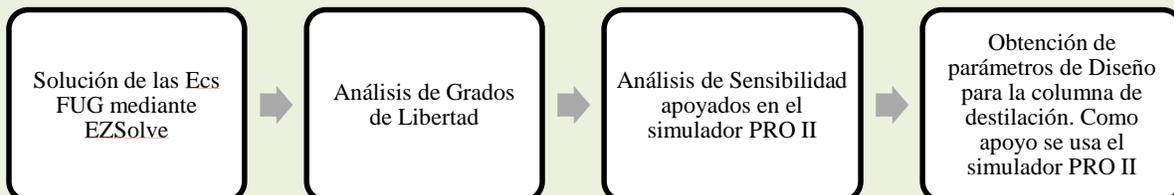
Para el criterio de convergencia se toma el propuesto por Wang y Henke (Henley³, 1999, pp 627).

$$\tau = \sum_{j=1}^N [T_j^{(k)} - T_j^{(k-1)}]^2 \leq 0.01 \quad \text{Ec 15}$$

METODOLOGÍA

En la Figura 2, se presenta el procedimiento que se realizó para la realización de este trabajo. Para el simulador PRO II se eligió el modelo de actividad NRTL extendido con la ecuación de estado Peng-Robinson, ya que la mayoría de ellos teóricamente son hidrocarburos y el modelo de actividad representa con precisión dichos componentes.

Figura 2



Procedimiento realizado

Winston⁴ (2006) define en forma genérica el análisis de sensibilidad como, "investigar los efectos producidos por los cambios del entorno sobre un sistema". El propósito general de realizar un análisis de sensibilidad es identificar las variables que puedan modificar la solución del problema planteado, además, ayuda a estimar y seleccionar con mayor precisión las variables y así obtener una solución óptima.

RESULTADOS

El flujo de alimentación considerado fue de Flujo: 5000 l/h, la temperatura igual a 396.35 °K con una presión de 134.591 kPa, la composición del pseudocomponente se presenta a continuación en la Tabla 1.

FORMANDO
PROFESIONALES
DE LA QUÍMICA"UN PILAR DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA EN ZACATECAS"

Tabla 1. Composición del Pseudocomponente

Componente	Composición	Componente	Composición	Componente	Composición
n-hexano	0.104986	n-C22	6.30E-02	1122-TetPhC2	2.47E-02
n-heptano	0.201662	n-C25	1.05E-02	TetPhenylC2	5.25E-02
n-decano	5.25E-02	n-C30	9.45E-02	TriPhenylC1	0.209972
n-C13	0.102143	Azufre	2.47E-02	TetraPhnylC1	6.30E-03
n-C17	5.25E-02				

Las ecuaciones FUG se resolvieron con el uso del software EZ-Solve. Se usa la ecuación de Antoine para evaluar la presión de vapor, con los parámetros presentados por Henley² (1999) para esta. El resultado que se obtiene es: número mínimo de etapas igual a 8 y Reflujo mínimo de 1.46.

Como primer paso se realiza un análisis de grados de libertad para conocer el número de variables que se deben especificar para el modelo propuesto. Para el modelo matemático que representa la columna propuesta se tiene que $N_D = 2N + C + 8$. Pueden ser: Número de etapas totales (N), Etapa de alimentación (N_F), Condensado a T de saturación (D), Presión de salida en el condensador (P_{DQ}), Reflujo (R), Relación (D/F), Flujo (F_F) y fracción molar de la alimentación (z_i), Temperatura de alimentación (T_F), Presión de alimentación (P_F), Presión en cada etapa (P_N), y el Calor en el divisor (Q_D).

Como segundo paso. Se realiza un análisis de sensibilidad con las variables a definir empleando los grados de libertad (variando una y permaneciendo constantes las demás). La primera variable elegida para este fin es el número de etapas con las cuales puede contar la columna de destilación en estudio, dando como resultado que se requiere una columna con ocho etapas (Figura 3a). Posteriormente se determina de la misma forma la etapa de alimentación y se encuentra que la óptima es la intermedia (Figura 3b). La siguiente variable analizada fue el reflujo encontrando que el óptimo es igual a 1.5



FORMANDO
PROFESIONALES
DE LA QUÍMICA

"UN PILAR DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA EN ZACATECAS"



Figura 3

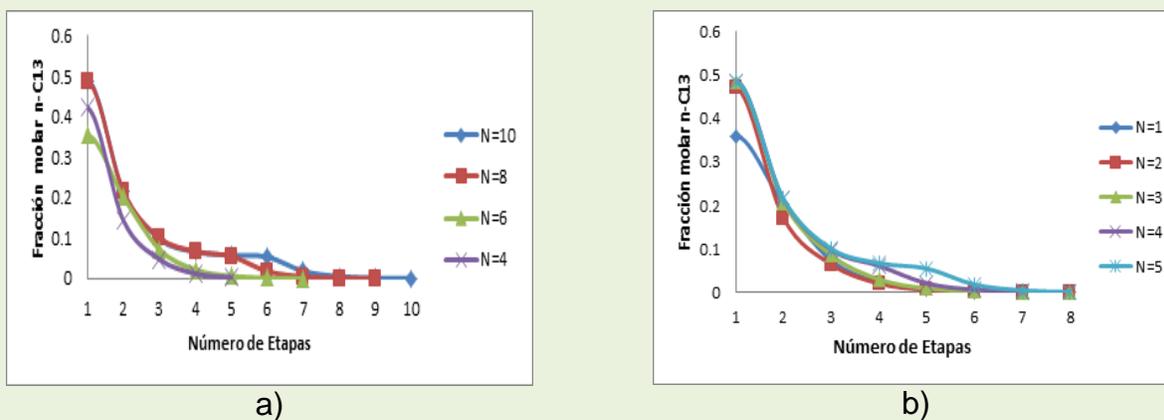


Gráfico del Análisis de Sensibilidad para a) Número de Etapas. b) Etapa de Alimentación

Otros datos obtenidos mediante el uso del PRO II son: la salida de destilado de la columna e igual a 1605 l/h, el espaciamento entre cada etapa es de 0.55 m, el diámetro de la columna igual a 1.5 m y la altura pronosticada para la columna es de 6.6 m.

CONCLUSIÓN

De acuerdo al diseño realizado la columna debe de tener las siguientes características: Número de Etapas igual a ocho, etapa de alimentación, la intermedia de la columna, espaciamento entre etapas 0.55 m, altura de la columna 6.6 m y diámetro de columna igual a 1.5. Además, el reflujo óptimo es de 1.5.



UAZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
ZACATECAS
"Francisco García Salinas"

UACQ



UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS QUÍMICAS

FORMANDO
PROFESIONALES
DE LA QUÍMICA"UN PILAR DE CIENCIA Y
TECNOLOGÍA EN ZACATECAS"

BIBLIOGRAFÍA

1. Sigala Valdez Jesús Octavio. "Simulación de una torre de destilación para una mezcla de aceites de motor". Tesis del P.A.I.Q. de la U.A.C.Q de la U.A.Z. Defendida: Oct 2014.
2. ENERGÉTICOS ECOLÓGICOS MIGA S.A. DE C.V. "Manifiesto de Impacto ambiental modalidad particular para la instalaciones de tratamiento, confinamiento o eliminación de residuos peligrosos" Los Reyes la Paz, Edo. de Méx. 2006
3. Henley E.J., Seader J.D. "Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química". Ed. Reverté, México, 1999.
4. Winston, W.L., "Investigación de Operaciones, Aplicaciones y Algoritmos", Universidad Indiana: Internacional Thomson. 2006
5. Bland F.W.-Davidson R.L., "Petroleum Processing Handbook", Editorial McGraw Hill, 1967.
6. García González Juan Manuel, et al.. "La simulación de procesos en ingeniería química", en *Investigación científica*, Vol. 4, No. 2, nueva época, mayo-agosto 2018.