

**ANÁLISIS DE LA SEPARACIÓN DE MEZCLAS DE COMPUESTOS DE ALTA VOLATILIDAD EMPLEANDO MÉTODOS RIGUROSOS****ANALYSIS OF THE SEPARATION OF MIXTURES OF COMPOUNDS OF HIGH VOLATILITY USING RIGOROUS METHODS**

Chan-Trinidad M.G.<sup>1</sup>, López-Villarreal F.<sup>2</sup>, Barajas-Fernández J.<sup>1</sup>,  
Olán-Acosta M.Á.<sup>1</sup>, Pantoja-Castro M.A.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura,  
CP. 86690, [www.ujat.mx](http://www.ujat.mx)

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología/Instituto Mexicano del Petróleo  
\* [m\\_pantojaq@yahoo.com.mx](mailto:m_pantojaq@yahoo.com.mx)

**RESUMEN**

En este trabajo se presentan dos casos de estudios en donde se analizó la separación de dos mezclas multicomponentes empleando métodos rigurosos con los cuales se modelan y resuelven las columnas como RadFrac, MultiFrac y PetroFrac. En el caso I, se estudió una mezcla de propano, i-butano, n-butano, i-pentano y n-pentano, mientras que el caso II se trabajó con una mezcla de metano, etano, propano, i-butano, n-butano, i-pentano, n-pentano y agua. Los dos casos fueron simulados mediante tres columnas denominadas *RadFrac*, *MultiFrac* y *PetroFrac* en un simulador comercial. El interés de modelar las mezclas en estas columnas fue para comparar las diferencias en el proceso de separación, la distribución de componentes, el perfil de temperatura y los requerimientos de servicios auxiliares. Los resultados de este trabajo muestran la distribución de flujos de acuerdo a las especificaciones dadas para cada caso así como el grado de separación obtenido en cada columna, el cual es alto para los compuestos de interés. Por otra parte los resultados de perfiles de temperatura en el caso I, presentan comportamientos similares entre las columnas, sin embargo, este

comportamiento no se aprecia en el caso II, debido a que los perfiles muestran una tendencia similar en las columnas *RadFrac* y *MultiFrac*, difiriendo en la de tipo *PetroFrac*.

**Palabras clave:** Destilación, métodos cortos, métodos rigurosos, procesos de separación, simulación.

### **ABSTRACT**

This work presents two cases of study where two multicomponent mixture separation were analyzed using rigorous methods which are modeled and solved as *RadFrac*, *MultiFrac*, and *PetroFrac* columns. In case I, a mixture of propane, n-butane, i-pentane, i-butane and n-pentane were studied while case II a mixture of methane, ethane, propane, i-butane, n-butane, i-pentane, n-pentane, and water were worked. The two cases were simulated using three columns called *RadFrac*, *MultiFrac*, and *PetroFrac* in a commercial Simulator. The interest of model mixtures in these columns was to compare the differences in the separation process, the distribution of components, the temperature profile and the requirements of auxiliary services. The results of this work show the distribution of flows according to the specifications given for each case as well as the degree of separation achieved in each column, which is high for the compounds of interest. On the other hand the results of temperature profiles in case I, presented similar behaviors between the columns, however, this behavior is not appreciated in case II, due to the profiles that show a similar trend in the columns *RadFrac* and *MultiFrac*, differing in the one type *PetroFrac*.

**Keywords:** Distillation, separation process, simulation, shortcuts methods, rigorous methods.

## INTRODUCCIÓN

Arthur Little en 1915 desarrolló el concepto de operaciones unitarias, desde entonces su estudio ha tomado una gran importancia debido a la necesidad que se tiene en obtener componentes esencialmente puros para la manufacturación de productos químicos [1]. En este sentido existe una gran variedad de operaciones unitarias que permiten la separación de mezclas [2] [3]

En la actualidad se llevan a cabo muchos estudios teóricos y experimentales [4-6] relacionados a la separación de mezclas como extracción, evaporación, absorción, destilación, entre otros, en los que se busca principalmente las condiciones con las cuales es posible obtener componentes con un alto grado de pureza.

En el caso del proceso de destilación, la mezcla se puede separar en dos o más fracciones en función de sus volatilidades relativas [8], es decir que tan fácil o difícil pasan los componentes a la fase vapor o líquida. Por otra parte, estudios realizados por Carrera et al., 2014 y Zhu et al., 2016 indican que la dificultad de la destilación se presenta en mezclas cuyos puntos de ebullición son próximos o existe presencia de azeótropos. De acuerdo al grado de separación especificada y a las columnas de separación empleadas, es posible generar modelos matemáticos basados en las ecuaciones que resultan de los balances de masa, calor y relaciones de equilibrio líquido-vapor que pueden ser modelados en estas columnas.

Estos modelos permiten analizar el proceso de separación que de acuerdo a la complejidad de los mismos y a las simplificaciones que se hagan en sus modelos matemáticos, han sido clasificados en métodos cortos y rigurosos, los cuales han sido

incorporados a columnas de destilación en simuladores comerciales permitiendo modelar y analizar el sistema deseado.

Los métodos cortos presentan la ventaja de que convergen en poco tiempo debido a que emplean simplificaciones en: las ecuaciones de balance de masa, cálculos de constantes de equilibrio así como volatilidades de cada compuesto, es decir, no realizan cálculos etapa a etapa, lo que conlleva a generar una menor cantidad de ecuaciones posibles para predecir el comportamiento de la separación [11].

Uno de los modelos cortos más conocidos es el método FUG, basado en las ecuaciones de Fenske-Underwood-Gilliland, que permiten el cálculo del número mínimo de etapas, la distribución de componentes en destilado y fondos de la columna, el reflujo mínimo, la relación del reflujo y el número de etapas teóricas principalmente [12].

Por otra parte, cuando se desea realizar un estudio a detalle de la columna, por ejemplo analizar el cambio de la temperatura o los flujos de líquido y vapor en cada etapa, es necesario utilizar los métodos rigurosos que eliminan simplificaciones y que no consideran comportamientos ideales en toda la columna.

En comparación con los métodos cortos, los métodos rigurosos permiten realizar: un diseño de la columna, distribuciones reales de los componentes en cada etapa, y calcular el perfil de temperaturas en toda la columna [13].

Considerando lo anterior, en el presente trabajo se analizó la separación multicomponente de dos casos de estudios. Se emplearon mezclas de hidrocarburos de alta volatilidad y su análisis se llevó a cabo en Aspen plus® considerando tres columnas de destilación que usan métodos rigurosos como medio de solución del modelo de separación.

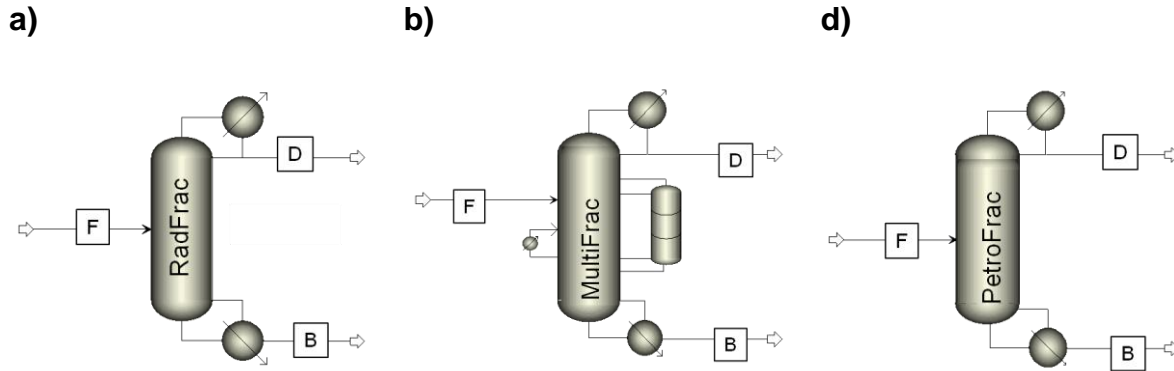
## METODOLOGÍA

Se realizó la simulación de dos casos de estudio los cuales se resolvieron utilizando las columnas tipo *RadFrac*, *MultiFrac* y *PetroFrac* en el simulador comercial Aspen Plus®.

**Descripción del caso I.** Este caso, se simuló una mezcla de hidrocarburos compuesta de propano ( $C_3H_8$ ), *i*-butano ( $i-C_4H_{10}$ ), *n*-butano ( $n-C_4H_{10}$ ), *i*-pentano ( $i-C_5H_{12}$ ), *n*-pentano ( $n-C_5H_{12}$ ). El flujo de alimentación fue de 0.013, 0.038, 0.063, 0.05 y 0.063 kg/s respectivamente [14].

Debido a que no se cuenta con muchas especificaciones para llevar a cabo la separación de esta mezcla en las columnas rigurosas, fue necesario obtener mayor información, y esto se realizó a partir de la simulación de este caso en una columna que usa la ecuación de Winn-Underwood como método corto y que es denominada como columna DSTWU, donde se especifican los componentes clave de la separación, los cuales son propano como componente clave ligero (LK) e *i*-butano como clave pesado (HK) con recuperaciones en el destilado del 99% y 1%, respectivamente.

A partir de esta columna se obtuvieron como datos el número de etapas, la etapa de alimentación y el reflujo actual, los cuales se presentan en la Tabla 1. en conjunto con las especificaciones de operación que son necesarios para modelar las columnas *RadFrac*, *MultiFrac* y *PetroFrac*. Para este caso de estudio se usó en las tres columnas el método termodinámico de Chao-Seader. En la Fig. 1 se muestran los bloques de operación con los que permiten identificar cada columna y que fueron utilizados para modelar esta separación.



**Fig.1.** Representación de las columnas analizadas para el caso I:

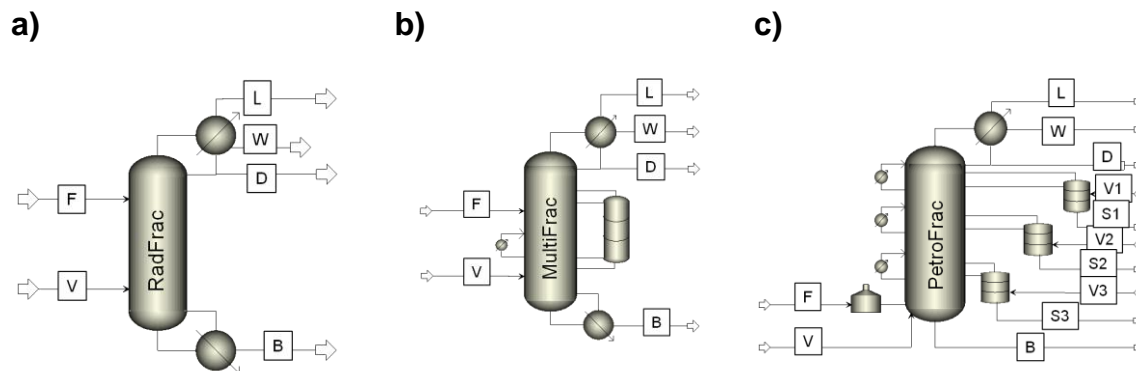
a) RadFrac, b) MultiFrac, c) PetroFrac.

**Tabla 1.** Especificaciones de alimentación y operación del caso I, considerando los datos obtenidos en la columna DSTWU.

<b>Especificaciones del Caso I</b>			
	<b>RadFrac</b>	<b>MultiFrac</b>	<b>PetroFrac</b>
Número de etapas	26	26	26
Etapas de alimentación de la mezcla	13	13	13
Presión de la columna (atm)	9.5	9.5	9.5
Tasa de destilado (l/s)	0.184	0.184	0.184
Reflujo actual	3.44	3.44	3.44
Condensador	Total	Total	total
Rehervidor	Kettle	Kettle	Kettle
Fases validas	Vapor-líquido	Vapor-líquido	Vapor-líquido
Presión de la alimentación (psia)	138	138	138
Temperatura de la alimentación (K)	300	300	300

**Descripción del caso II.** El caso de estudio dos es una mezcla multicomponente conformada por metano ( $\text{CH}_4$ ), etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), i-butano ( $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$ ), n-butano ( $n\text{-C}_4\text{H}_{10}$ ), i-pentano ( $i\text{-C}_5\text{H}_{12}$ ), n-pentano ( $n\text{-C}_5\text{H}_{12}$ ) y agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) con flujos molares de alimentación de  $1 \times 10^{-4}$ ,  $1.4 \times 10^{-3}$ ,  $1.2 \times 10^{-2}$ ,  $3.2 \times 10^{-2}$ ,  $1.4 \times 10^{-1}$ ,  $4.8 \times 10^{-1}$ ,  $6.7 \times 10^{-1}$ ,  $2.5 \times 10^{-2}$  kg/s respectivamente [15].

Las especificaciones de alimentación y operación de las columnas *RadFrac*, *MultiFrac* y *PetroFrac* se presentan en la Tabla 2.



**Figura 2.** Representación de las columnas analizadas para el caso II:

a) *RadFrac*, b) *MultiFrac*, c) *PetroFrac*.

**Tabla 2.** Especificaciones de alimentación y operación del caso II.

<b>Especificaciones del caso II</b>			
	<b>RadFrac</b>	<b>MultiFrac</b>	<b>PetroFrac</b>
Número de etapas	26	26	26
Etapa de alimentación de la mezcla	22	22	22
Etapa de alimentación del vapor	26	26	26
Presión de la columna (psia)	15.7	15.7	15.7
Tasa de destilado (l/s)	18.4	18.4	18.4
Fracción vapor del destilado	0.2	0.2	0.2
Condensador	Parcial vapor-líquido	Parcial vapor-líquido	Parcial vapor-líquido
Rehervidor	Sin rehervidor	Sin rehervidor	Sin alimentación en el fondo
Fases validas	Vapor-líquido-agua libre	Vapor-líquido-agua libre	Vapor-líquido-agua libre
Presión de la alimentación (psia)	44.7	44.7	44.7
Temperatura de la alimentación (K)	320	320	320
Presión del vapor (atm)	3.5	3.5	3.5
Temperatura del vapor (K)	450	450	450
Flujo del vapor (mol/s)	1.5	1.5	1.5



## RESULTADOS

Los resultados de este trabajo se presentan de acuerdo al caso de estudio analizado.

**Resultados del caso I.** En la separación de la mezcla del caso compuesta por propano, i-butano, n-butano, i-pentano, n-pentano [14], se obtuvo la distribución de los componentes en las tres columnas.

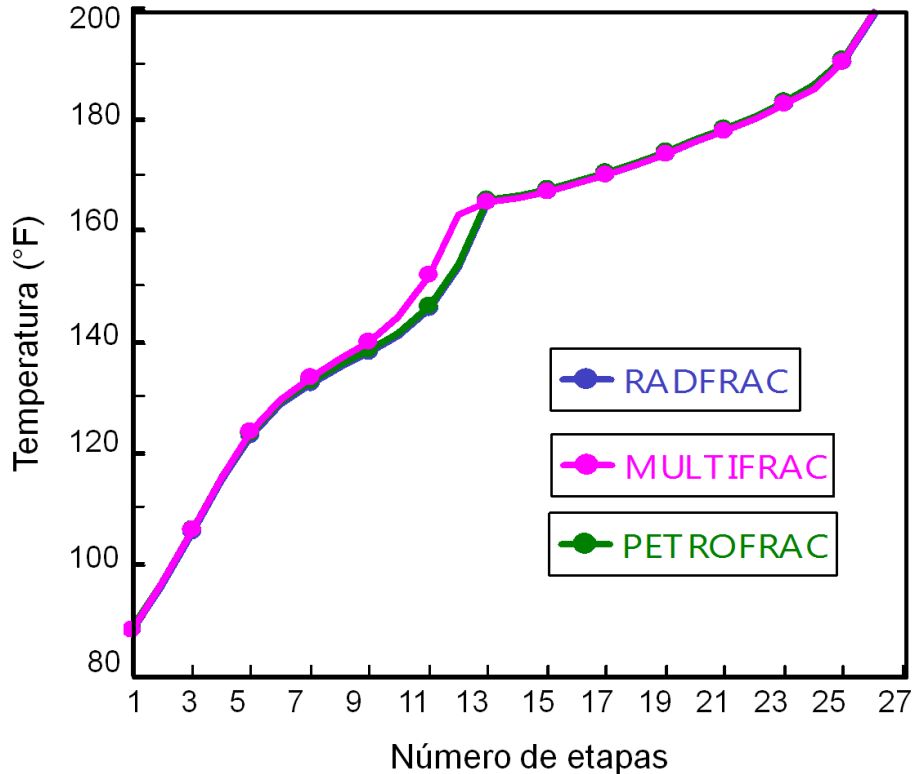
Previamente con las especificaciones de separación para este caso, fue necesario emplear una columna DSTWU basada en un método corto. Lo anterior fue debido a que se tiene limitación de información de parámetros requeridos para modelar las columnas *RadFrac*, *MultiFrac* y *PetroFrac* como son: el número de etapas, la etapa de alimentación, el reflujo actual, entre otros, los cuales se presentaron en la Tabla 1 como datos de alimentación.

Por otra parte, en la Tabla 3 se reportan los resultados obtenidos para las tres columnas: flujos molares de la alimentación (F), destilado (D) y fondo (B), así mismo, se presentan los parámetros de temperatura en grados Fahrenheit, presión en psia y el estado físico de la mezcla a partir de las fracciones de vapor y líquido en las corrientes de entrada y salida.

En la Fig. 3 se presentan los perfiles de temperatura obtenidos en cada plato para las columnas *RadFrac*, *MultiFrac* y *PetroFrac* del caso I que se ha determinado desde la primera etapa hasta la etapa veintiséis, en un intervalo de temperatura de 300 a 370 K.

**Tabla 3.** Flujos y parámetros de las columnas RadFrac, MultiFrac y PetroFrac del caso.

Resultados de las columnas RadFrac, MultiFrac y PetroFrac del caso I							
	RadFrac			MultiFrac		PetroFrac	
	F	D	B	D	B	D	B
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	100	84.76	15.23	84.76	15.23	84.76	15.23
<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	300	13.09	286.90	13.09	286.90	13.09	286.90
<i>n</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	500	2.13	497.86	2.13	497.86	2.13	497.86
<i>i</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	400	0.00030	399.99	0.0003	399.99	0.0003	399.99
<i>n</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	500	5.48e <sup>-05</sup>	499.99	5.48e <sup>-05</sup>	499.99	5.48e <sup>-05</sup>	499.99
Flujo Total (mol/s)	0.22	0.01	0.21	0.01	0.02	0.012	0.02
Temperatura (k)	75	88.40	199.42	88.40	199.42	88.41	199.42
Presión (atm)	138	138	138	138	138	138	138
Fracción vapor	0	0	0	0	0	0	0
Fracción líquido	1	1	1	1	1	1	1



**Figura 3.** Perfil de temperatura en cada etapa de las columnas *RadFrac*, *MultiFrac* y *PetroFrac* del caso I.

**Resultados del caso II.** A partir de la simulación de la separación de la mezcla de metano, etano, propano, *i*-butano, *n*-butano, *i*-pentano, *n*-pentano y agua, utilizando las columnas rigurosas *RadFrac*, *MultiFrac* y *PetroFrac*, se presentan los resultados en las Tablas 4 y 5, donde se muestran los flujos molares de cada componente presente en los productos obtenidos: destilado (D), fondo (B), ligeros (L), vapor (V) y agua (W), así como también la presión y temperatura con las que se obtuvieron dichos productos, de igual forma se presentan las fracciones de vapor y de líquido obtenido en cada flujo.

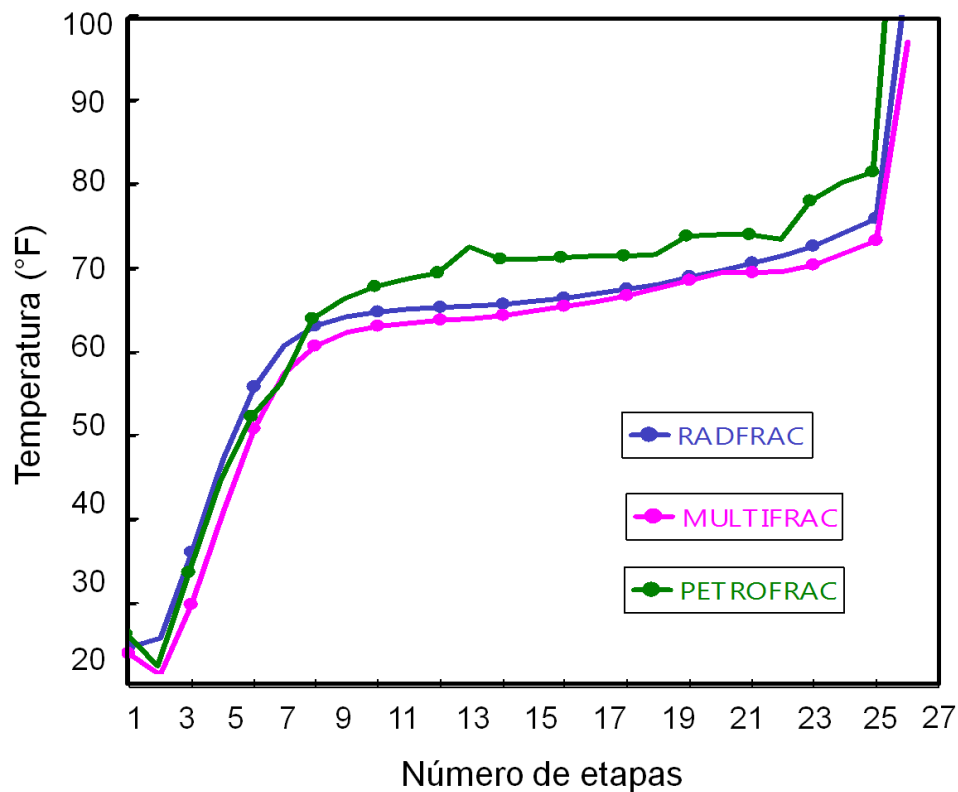
**Tabla 4.** Flujos y parámetros del caso II de las columnas RadFrac y MultiFrac.

Resultados de las columnas RadFrac y MultiFrac en el caso II											
	RadFrac						MultiFrac				
	F	D	B	L	V	W	D	B	L	V	W
CH <sub>4</sub>	0.81	0.019	2.27x10 <sup>-11</sup>	7.99x10 <sup>-01</sup>	0	0	0.019	9.33x10 <sup>-12</sup>	0.79	0	0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	11.20	2.18	4.67x10 <sup>-06</sup>	9.02	0	0	2.20	2.16x10 <sup>-06</sup>	9.00	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	96.36	50.32	0.026	46.01	0	0	50.71	0.013	45.62	0	0
<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	256.75	191.05	5.18	60.51	0	0	193	2.95	60.17	0	0
<i>n</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1098	826.26	97.59	174.62	0	0	858.	62.27	177.	0	0
<i>i</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3782	86.94	3689.97	5.96	0	0	56	3722	3.81	0	0
<i>n</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	5349	0.21	5348.92	0.010	0	0	0.19	5349	0.009	0	0
H <sub>2</sub> O	202.27	0.05	6644.69	1.25	9304	2861	0.05	5296	1.27	9304	4208
Flujo total (l/s)	1.36	0.014	1.99	0.003	1.17	0.036	0.014	1.8	0.037.	1.017	0.053
Temperatura (K)	320	270	313	270	450	270	268	310	268	450	268
Presión (atm)	3	1	1	1	50	1	1	1	1	50	1
Fracción vapor	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
Fracción líquido	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1

**Tabla 5.** Flujos y parámetros del Caso II en la columna PetroFrac. (continuación)

Resultados de la columna PetroFrac en el Caso II												
	F	D	B	L	S1	S2	S3	V	V1	V2	V3	W
CH <sub>4</sub>	0.81	0.019	4.05x10 <sup>-12</sup>	0.79	1.24x10 <sup>-12</sup>	3.13x10 <sup>-12</sup>	1.33x10 <sup>-10</sup>	0	0	0	0	0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	11.20	2.12	8.13x10 <sup>-07</sup>	9.07	8.16x10 <sup>-06</sup>	2.48x10 <sup>-06</sup>	1.09x10 <sup>-05</sup>	0	0	0	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	96.36	49.34	0.004	46.82	0.14	0.022	0.023	0	0	0	0	0
<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	256	182.31	0.77	60.32	8.66	2.93	1.72	0	0	0	0	0
<i>n</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1098	762.21	15.88	168.63	95.43	36.30	20.02	0	0	0	0	0
<i>i</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	3782	137.87	1447	9.97	942.05	870.63	375.05	0	0	0	0	0
<i>n</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	5349	13.13	3374	0.67	353.69	989.84	617.57	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	202	0.06	6547	1.34	30.82	44.17	22.26	9304	323	1213	809	5207
Flujo total (l/s)	10797	1147	11385	297.65	1430.81	1943.92	1036	9304	323	1213	809	5207
Temperatura (K)	320	269	327	326	267	266	267	449	449	449	449	449
Presión (atm)	3	3	1	1	1	1	1	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Fracción Vapor	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0
Fracción Líquido	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1

En la Fig. 4 se observan los perfiles de temperatura en cada uno de los platos obtenidos en las columnas rigurosas *RadFrac*, *MultiFrac* y *PetroFrac* desde la etapa uno hasta la etapa veintiséis en un intervalo de temperatura de 260 a 310 K.



**Figura 4.** Perfil de temperatura en cada etapa de las columnas RadFrac, MultiFrac y PetroFrac del caso II.

## DISCUSION

A partir de los resultados obtenidos en este trabajo para los dos casos analizados mediante el empleo de columnas de tipo *RadFrac*, *MultiFrac* y *PetroFrac*, se encontró que la distribución de componentes es similar entre las columnas y para cada caso, ya que no hay variación significativa entre los flujos molares de los productos de salida.

Los resultados asociados a los flujos molares, no reflejan que en otro tipo de mezclas se vaya a obtener el mismo comportamiento en las tres columnas, debido a que los resultados pueden variar significativamente de acuerdo a la complejidad de la mezcla así como del requerimiento de los accesorios presentes en las columnas de tipo *MultiFrac* y *PetroFrac* principalmente como son: la implementación de bombas de recirculación, separadores laterales, hornos de alimentación y columnas internas.

Estas modificaciones en la configuración de las columnas, provocan el aumento del número de especificaciones de operación, entradas y salidas requeridas. En ocasiones cuando no se cuenta con toda la información para modelar estas columnas (*MultiFrac* y *PetroFrac*), se hace uso de la columna *RadFrac*, siendo así una de las columnas más utilizadas debido a que la cantidad de especificaciones requeridas es menor comparado con las otras dos columnas.

La columna *RadFrac* puede simular una separación empleando el método riguroso, generando una aproximación a los resultados que se pueden obtener por las columnas *MultiFrac* y *PetroFrac*, sin embargo, esta columna en ocasiones no resulta apropiada emplearla, por ejemplo en casos donde la columna *MultiFrac* tiene mayor eficiencia debido a la implementación de hornos de alimentación y prefraccionadores con múltiples interconexiones que permiten la separación en mezclas donde se requieren dos o más columnas, utilizando una sola, generando un ahorro considerable en cargas y energía del proceso.

Otro caso donde no es adecuado usar Columnas *RadFrac* es también en casos de refinería y craqueo de petróleo o donde se requieren obtener múltiples productos intermedios en la separación, por lo que en estas situaciones la columna *PetroFrac* es

más eficiente mediante el uso de separadores laterales y bombas de recirculación, pero como se explicó anteriormente su simulación puede volverse complicada y el uso de columnas de tipo *RadFrac* solo daría resultados aproximados aun empleando un método riguroso.

Por otra parte, los perfiles de temperatura obtenidos en el caso I donde el problema no sugiere trabajar con elementos o accesorios laterales a las columnas, mediante este análisis se encontró que las tres columnas tienen un comportamiento similar entre sí.

Sin embargo en los perfiles de temperatura del caso II, se muestra que el comportamiento interno de las columnas a lo largo de las etapas difiere significativamente de la etapa 5 hasta la 22 ya que se tiene una variación de la temperatura entre los tres métodos rigurosos, y esta es diferente hasta en 10 °F. La mayor desviación ocurre en la columna *PetroFrac*.

El resultado anterior es derivado de los accesorios que el problema indica implementar en esta columna, es decir, incluir el uso de separadores laterales y bombas de recirculación que presentan entradas y salidas en la sección intermedia de la columna que modifica el número de ecuaciones a resolver basadas en entradas y salidas.

Así mismo el análisis del caso I, muestra que cuando no se cuenta con datos suficientes para modelar columnas que emplean métodos rigurosos es muy importante previamente el uso de columnas basadas en métodos cortos o métodos simplificados, es decir modelos que requieren pocos datos de operación.

En el análisis dos, no fue necesario utilizar la columna de método corto debido a que el caso de estudio especifica los datos de alimentación necesarios para usar directamente columnas basadas en métodos rigurosos.



## CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la separación de mezclas multicomponente de dos casos de estudio empleando tres columnas de separación (*RadFrac*, *Multifrac* y *Petrofrac*) del software comercial (Aspen Plus ®), que emplean métodos rigurosos para la obtención de resultados más detallados del proceso de separación, como son perfiles de temperaturas, presión, distribución de componentes, entre otros.

El uso de columnas que emplean métodos rigurosos, permite obtener resultados en la distribución de los componentes más apegados al proceso real de separación a nivel industrial, sin embargo, estas columnas tienen un alto grado de complejidad cuando son analizadas teóricamente debido a que los cálculos se hacen etapa por etapa y se genera un conjunto de ecuaciones que se deben resolver de forma simultánea además estas columnas requieren mayores especificaciones en las corrientes de entradas entre las cuales se mencionan: etapa de alimentación, reflujo, tasa de destilado, cargas del condensador y rehervidor, entre otras, las cuales dependerán de las distintas características y accesorios requeridos para cada columna.

De manera general las mezclas multicomponentes se pueden modelar en cualquiera de las columnas que usan métodos rigurosos para analizar el proceso de separación, sin embargo en este trabajo se demostró a partir de los resultados y comparación entre estas columnas, que no siempre se encuentra el mismo comportamiento de perfiles de flujos, fracciones molares de líquido y vapor así como de temperatura aun cuando están diseñadas bajo el mismo método riguroso, lo cual es derivado también de las especificaciones particulares que pueda poseer cada columna y cada mezcla bajo estudio.

**REFERENCIAS**

- [1] Henley E. J., Seader J. D. (1988). Operaciones de separación por etapas de equilibrio en ingeniería química. España: Reverté.
- [2] Foust A. S., Wenzel L. A., Clump C. W., Maus L., Andersen L. B. (2006). Principios de operaciones unitarias (segunda edición). México: Compañía editorial continental.
- [3] Geankoplis C. J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias (tercera edición). México: Compañía editorial continental.
- [4] Tavan Y., Shahhosseini, S., & Hosseini S. H. (2014). Design and simulation of ethane recovery process in an extractive dividing wall column. *Journal of cleaner production*, 72, pp 222-229.
- [5] Chen M., Li Z., Li J., Li Q., & Zhang, L. (2017). The extraction of uranium using graphene aerogel loading organic solution. *Talanta*, 166, pp 284-291.
- [6] Castro M., Gómez-Díaz, D., & Navaza, J. M. (2017). Carbon dioxide chemical absorption using methylpiperidines aqueous solutions. *Fuel*, 197, pp 194-200.
- [7] Treybal R. E. (1988). Operaciones de transferencia de masa (segunda edición). México: McGraw Hill.
- [8] Marcilla A., Gómez A., García Á. N., & Cayuela P. (1998). Introducción a las Operaciones de Separación: Cálculo por etapas de equilibrio. Alicante: publicaciones Universidad de Alicante.
- [9] Carrera M., Segovia J. G., Hernández H., Hernández S., & Bonilla A. (2014). A note on an extended short-Cut method for the design of multicomponent reactive distillation columns. *Chemical engineering research and design*, 92(1), 1-12.

- [10] Zhu Z., Xu D., Liu X., Zhang Z., & Wang Y. (2016). Separation of acetonitrile/methanol/benzene ternary azeotrope via triple column pressure-Swing distillation. *Separation and purification technology*, 169, 66-77.
- [11] Wankat P. C. (2008). *Ingeniería de procesos de separación (segunda edición)*. México: Pearson educación.
- [12] Luyben W. L. (2013). *Distillation design and control Using aspen simulation (segunda edición)*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [13] Towler G., & Sinnott R. K. (2012). *Chemical engineering design: Principles, Practice and economics of plant and process design (segunda edición)*. United States of America:
- [14] Finlayson B. A. (2006). *Introduction to chemical engineering computing*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- [15] Jana A. K. (2009). *Process simulation and control using ASPEN*. India: PHI Learning Pvt. Ltd.

