



DESEMPEÑO DINÁMICO DE ESQUEMAS ALTERNATIVOS A LA COLUMNA PETLYUK (COLUMNA DE PARED DIVISORIA) PARA LA SEPARACIÓN DE MEZCLAS TERNARIAS

DYNAMIC BEHAVIOR OF ALTERNATE SCHEMES TO PETLYUK COLUMN (DIVIDING WALL COLUMN) FOR SEPARATION OF TERNARY MIXTURES

J. Martínez-Cisneros, A. A. Hernández-Sánchez, J.G. Segovia-Hernández*, S. Hernández, H. Hernández

*Universidad de Guanajuato, Departamento de Ingeniería Química,
Noria Alta s/n, Guanajuato, Gto., México 36050*

Recibido 25 de Julio 2008; Aceptado 8 de Diciembre 2008

Resumen

Los sistemas de destilación térmicamente acoplados han sido propuestos ya que pueden efectuar la tarea de separación de una mezcla utilizando bajos consumos energéticos en comparación con los esquemas convencionales de destilación. La estructura de estos sistemas complejos ofrece retos en el área de control debido a la transferencia de corrientes de vapor (o líquido) entre las columnas. En particular, la presencia de los reciclos en estos sistemas acoplados ha generado la noción de que algunos problemas de control pueden ser detectados durante la operación de dichos sistemas en comparación con el buen desempeño de las secuencias de destilación convencionales. Esta es una de las principales razones para que no haya un amplio uso de las columnas térmicamente acopladas a nivel industrial. Recientemente algunos esquemas alternos a la columna Petlyuk han sido propuestos. En este trabajo se analiza las propiedades de control de dos esquemas alternativos a la columna Petlyuk. El desempeño dinámico de los sistemas es analizado utilizando la técnica de la descomposición en valores singulares y mediante simulaciones dinámicas rigurosas. Los resultados muestran que las estructuras alternativas muestran mejores propiedades de control que la estructura Petlyuk convencional.

Palabras clave: columna Petlyuk, propiedades de control, ahorro de energía, columnas alternativas, diseño.

Abstract

Thermally coupled distillation systems have been proposed to perform distillation separation tasks with the incentive of achieving lower energy consumption levels with respect to conventional distillation sequences. The structure of the complex systems offers some control challenges arising from the transfer of vapor (or liquid) streams between the columns. In particular, the presence of recycle streams in the coupled schemes has influenced the notion that control problems might be expected during the operation of those systems with respect to the rather well-known behavior of conventional distillation sequences. That has been one of the main reasons for the lack of industrial implementation of thermally coupled distillation schemes. Recently, some alternate schemes to Petlyuk column have been proposed. In this work, we analyze the control properties of two alternative distillation schemes to the Petlyuk column. The dynamic behavior is analyzed using the technique of singular value decomposition and rigorous dynamic simulations. The results indicate that alternate structures show better control properties than traditional Petlyuk structure.

Keywords: Petlyuk column, control properties, energy savings, alternative sequences, design.

1. Introducción

La destilación continúa siendo uno de los procesos de separación de mayor uso dentro de la industria química; sin embargo, se caracteriza por requerir grandes cantidades de energía en los rehervidores, la cual es suministrada tradicionalmente por medio de vapor. Teniendo en cuenta este aspecto, los

esfuerzos de investigación en el área de diseño de procesos se han direccionado a obtener nuevos esquemas de separación que puedan presentar un ahorro sustancial en el consumo de energía. Dentro de los esquemas de destilación propuestos están las secuencias de destilación térmicamente acopladas, las cuales en el caso de la separación de mezclas ternarias (A,B,C) han mostrado ahorros de energía

* Autor para la correspondencia. E-mail: gsegovia@quijote.ugto.mx
Tel: (52) 473 73 20006 ext 8142

entre 30 y 50% en comparación con las secuencias de destilación convencionales (Tedder y Rudd, 1978; Glinos y Malone, 1988; Triantafyllou y Smith, 1992; Finn, 1993; Hernández y Jiménez, 1996, 1999a, 1999b; Jiménez y col., 2001, entre otros). Para el caso de la separación de mezclas ternarias, las secuencias de destilación con acoplamiento térmico que han sido más estudiadas en aspectos de consumo de energía son: la secuencia de destilación térmicamente acoplada a un rectificador lateral (STAD; Fig. 1), la secuencia de destilación térmicamente acoplada a un agotador lateral (STAI; Fig. 2) y la secuencia de destilación con acoplamiento térmico total también conocida como columna Petlyuk o columna de pared divisoria (Fig. 3).

Estas tres secuencias de destilación con acoplamiento térmico compiten favorablemente en el consumo de energía en comparación con las clásicas secuencias de destilación convencionales, en la separación de mezclas ternarias con bajo o alto contenido de componente intermedio. El ahorro energético en las secuencias de destilación con acoplamiento térmico ha sido explicado en términos del remezclado. Si se considera la secuencia de destilación convencional directa en términos del perfil de concentración del componente intermedio (B) en la primera columna de la secuencia directa, la concentración de B empieza a aumentar hasta un valor máximo en algún plato intermedio y después disminuye hasta alcanzar el fondo de la columna, esto se conoce como remezclado y está asociado con la ineficiencia energética de la secuencia de destilación convencional directa, ya que para alcanzar nuevamente esta separación se deberá de adicionar más energía (Triantafyllou y Smith, 1992; Hernández y col., 2003). A pesar de que se ha predicho un ahorro de energía del orden del 30% en las secuencias de destilación con acoplamiento térmico en comparación con las secuencias de destilación convencionales, no ha sido sino hasta en los últimos años que se han comenzado a utilizar con mayor frecuencia en la industria (Kaibel y Shoemakers, 2002). Las razones por las que las secuencias con acoplamiento térmico no se habían utilizado ampliamente eran: no se conocía suficiente sobre el diseño y optimización y además se pensaba que el consumo de energía se lograba a expensas de crear un proceso más difícil de controlar (Triantafyllou y Smith, 1992). Esto motivó el desarrollo de metodologías de diseño y optimización de secuencias de destilación térmicamente acopladas (Triantafyllou y Smith, 1992; Finn, 1993; Hernández y Jiménez, 1996, 1999a, Muralikrishna y col., 2002; Vaca y col., 2007; Malinen y Tanskanen, 2007; entre otros). Además, se empezó a explorar, en menor grado, las propiedades de control de las secuencias de destilación con acoplamiento térmico, llegándose a la conclusión de que las secuencias de destilación térmicamente integradas no eran más difíciles de controlar que los esquemas convencionales, más aún

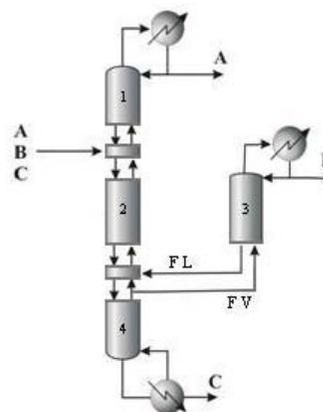


Fig. 1. Secuencia de destilación térmicamente acoplada a un rectificador lateral (STAD).

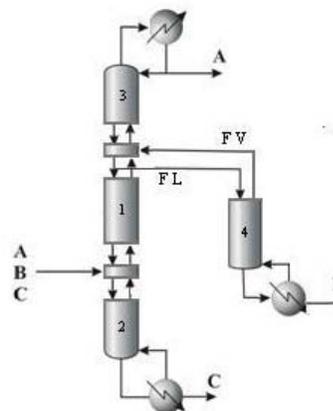


Fig. 2. Secuencia de destilación térmicamente acoplada a un agotador lateral (STAI).

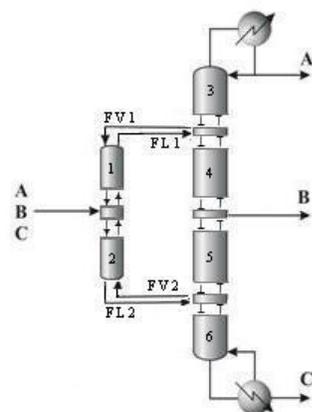


Fig. 3. Secuencia de destilación con acoplamiento térmico total (columna Petlyuk; PTLK).

las propiedades dinámicas de las secuencias integradas podían ser mejores que las de los esquemas convencionales (Hernández y Jiménez, 1999; Jiménez y col., 2001; Segovia – Hernández y col., 2002a; Segovia – Hernández y col., 2002b; Serra y col., 2003; Segovia – Hernández y col.,

2004; Segovia – Hernández y col., 2005a; Segovia – Hernández y col., 2005b; Segovia – Hernández y col., 2005c; Alcántara – Ávila y col., 2006; Segovia – Hernández y col., 2006a; Segovia – Hernández y col., 2006b; Segovia – Hernández y col., 2007a; Segovia – Hernández y col., 2007b). Las tendencias actuales en cuanto a diseño de secuencias térmicamente acopladas son desarrollar métodos de diseño y optimización cada vez más complejos, usualmente basados en técnicas de programación matemática u optimización estocástica (Dunneber y Pantelides, 1999; Yoemans y Grossmann, 2001, entre otros). Además, se han propuesto nuevos esquemas de destilación con acoplamiento térmico para la separación de mezclas de más de tres componentes (Rong y Kraslawski, 2002). En referencia con el control de los esquemas integrados de destilación se continúa en la dirección de mejorar las respuestas dinámicas bajo la acción de diferentes controladores (Segovia – Hernández y col., 2007b).

En los últimos años se han propuesto arreglos que teóricamente pueden presentar mejores propiedades de control en comparación con los esquemas acoplados tradicionales. Por ejemplo, Agrawal y Fidkowski (1998) realizaron un análisis sobre las posibles causas de los problemas de control de la columna Petlyuk y encontraron que la mayor desventaja de este sistema es la dirección en que las corrientes de vapor tienen que ser transferidas, debido a que se necesita que la presión del domo del prefraccionador sea mayor que la del domo de la columna principal, y por otro lado, en la parte inferior del sistema la diferencia de presiones debe ser inversa, es decir, la presión en los fondos de la columna principal debe ser mayor que en los fondos del prefraccionador. Por lo tanto, una pequeña caída de presión en el sistema tendrá efectos importantes en su operabilidad. Ante este problema sugieren algunos esquemas alternativos que eliminan el problema de la direccionalidad de los flujos y que potencialmente pueden tener un buen desempeño dinámico.

Recientemente, Gómez-Castro y col., (2008) han propuesto dos modificaciones a la columna de pared divisoria (utilizando una o dos paredes divisorias para su implementación física). Estas modificaciones se presentan en la Fig. 4. Bajo este contexto en el presente trabajo se buscará estudiar las propiedades de control, utilizando técnicas bien conocidas y que han sido aplicadas en el estudio del desempeño dinámico de procesos similares (por ejemplo, los reportados por Chen, 2002; Wang y col., 2008a; Wang y Wong, 2008b; Kaymak y Luyben 2008; Luyben, 2008a; Luyben, 2008b) y analizar el efecto de la topología en el desempeño dinámico de estas configuraciones alternativas en comparación con el esquema tradicional de la columna de pared divisoria (Petlyuk).

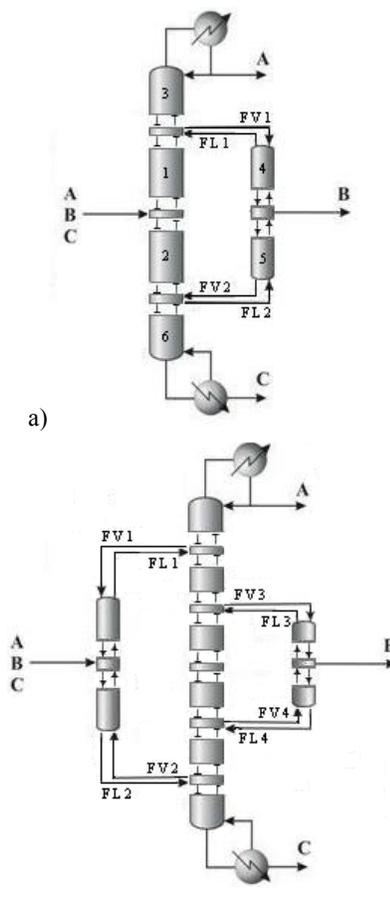


Fig. 4. Modificaciones a la columna Petlyuk; a) utilizando un postfraccionador (APTLK), b) utilizando un prefraccionador y un postfraccionador (PTLKP).

2. Diseño de las columnas complejas

El diseño de las tres secuencias de pared divisoria (Petlyuk) se lleva a cabo mediante la metodología propuesta por Hernández y Jiménez (1996, 1999a). La metodología propone una secuencia inicial basada en columnas convencionales. Las columnas tipo Petlyuk provienen de un arreglo de tres columnas (prefraccionador seguido de dos columnas binarias) tal y como se muestra en la Fig. 5. Los grados de libertad disponibles una vez que se han hecho las especificaciones de diseño son utilizados para obtener las condiciones de operación bajo las cuales los sistemas acoplados alcanzan el mínimo consumo de energía. El procedimiento de búsqueda proporciona los valores óptimos para los flujos de interconexión de vapor y líquido. Utilizando el modelo desarrollado por Hernández y Jiménez (1996) se llevaron a cabo simulaciones rigurosas para examinar los sistemas diseñados. El modelo está basado en las ecuaciones de balance de materia total y por componente, relaciones de equilibrio, restricciones como sumatoria, balance de energía y la hidráulica de la etapa. Debido a las corrientes de

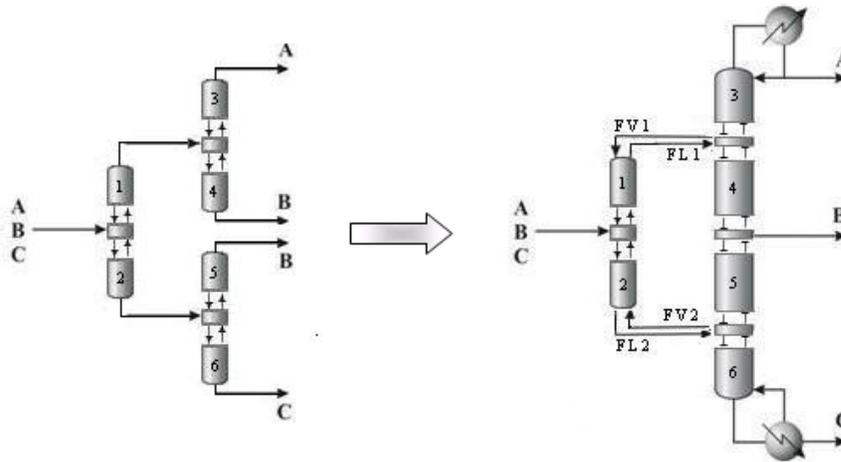


Fig. 5. Diseño de la columna Petyuk .

reciclo que existen entre ambas columnas las ecuaciones se encuentran acopladas por lo que el sistema de ecuaciones se debe resolver simultáneamente. Más detalles sobre el diseño y la optimización de los sistemas tipo Petlyuk se encuentran en Gómez-Castro y col. (2008).

3. Descomposición en Valores Singulares (SVD)

La SVD presenta las bases para llevar a cabo una comparación de las propiedades teóricas de control entre dos o más sistemas. Considérese una matriz cualquiera G de $n \times m$. La descomposición en valores singulares descompone la matriz en tres matrices de componentes, de la siguiente manera:

$$G = V \Sigma W^H \quad (1)$$

donde V es una matriz ortonormal de $n \times n$ cuyas columnas se conocen como vectores singulares izquierdos, W es una matriz ortonormal de $m \times m$ cuyas columnas son conocidas como vectores singulares derechos, Σ es una matriz de $n \times m$ cuyos elementos son escalares y son llamados valores singulares, los cuales se encuentran organizados en orden descendente. En seguida se describen los parámetros obtenidos a partir del SVD; los cuales auxiliarán para analizar la controlabilidad que presentan las secuencias de destilación con pared divisoria. La magnitud del valor singular mínimo, σ_* , indica las dificultades potenciales que el sistema presentaría al implementar un esquema de control retroalimentado. Por otro lado, se define el número de condición (γ) como el cociente entre el valor singular máximo y el valor singular mínimo. El número de condición cuantifica la sensibilidad del sistema a inexactitudes en los parámetros del proceso y a errores de modelado. Por tanto, se deben identificar los sistemas con altos valores de σ_* y bajos números de condición, ya que se espera que dichos sistemas presenten el mejor comportamiento dinámico bajo un control retroalimentado (Klema y Laub, 1980; Papastathopoulou y Luyben, 1991; Gabor y Mizsey, 2008).

4. Simulación dinámica de las secuencias de pared divisoria

Una vez obtenidos los diseños óptimos de las secuencias de pared divisoria, se llevó a cabo un análisis dinámico utilizando Aspen Dynamics. Las composiciones de los productos se toman como las variables de control y como variables manipulables se usaron los reflujos y las cargas térmicas suministradas a los ebulliciones y el flujo de la corriente lateral. En cada lazo de control se utilizaron controladores PI, los cuales se sintonizaron de acuerdo a una minimización del IAE (integral del error absoluto) para determinar los valores de las ganancias de los controladores (K_c) y las constantes de tiempo integral (τ_i).

5. Casos de estudio

Para comparar el comportamiento de las secuencias se analizaron seis mezclas ternarias; esta variedad de mezclas se estudiaron para observar el efecto de la volatilidad en los resultados. La descripción de las mezclas está en la Tabla 1. El flujo de alimentación es de 45.36 Kmol/hr. Las purezas de los componentes se fijaron para la mezcla ternaria (A, B, C) con los siguientes valores de fracción mol (0.987, 0.98, 0.986) respectivamente. La presión de diseño, para cada una de las secuencias, se seleccionó para garantizar el uso de agua de enfriamiento en los condensadores.

6. Resultados

Los resultados presentados corresponden a la descomposición en valores singulares y a las respuestas dinámicas de cada una de las secuencias cuando se tienen cambios en los set points. Para todos los casos se realizaron los siguientes cambios en los set points de las composiciones de los productos: de 0.987 a 0.991 para A; de 0.98 a 0.984 para B y de 0.986 a 0.99 para C.

Tabla 1. Casos de estudio.

Mezcla	Componentes	Simbología	Composición Alimentación
M1	n – butano	A	0.40
	n – pentano	B	0.20
	n - hexano	C	0.40
M2	n – butano	A	0.15
	n – pentano	B	0.70
	n - hexano	C	0.15
M3	n – butano	A	0.40
	isopentano	B	0.20
	n – pentano	C	0.40
M4	isopentano	A	0.40
	n - pentano	B	0.20
	n - hexano	C	0.40
M5	Benceno	A	0.40
	Tolueno	B	0.20
	Etilbenceno	C	0.40
M6	Tolueno	A	0.40
	Etilbenceno	B	0.20
	o - xileno	C	0.40

En las Tablas 2 a 4 se muestran las funciones de transferencia para las columnas utilizadas para el estudio de SVD para el caso de estudio M1. En la Fig. 6 se observa que el número de condición para la columna Petlyuk es el más grande comparado con los obtenidos para la columna PTLKP, para la cual el γ^* se mantiene en valores bajos para todo el rango de frecuencias. En la Fig. 7 los valores mayores del valor singular mínimo están dados para la columna PTLKP; de acuerdo a la interpretación de la SVD, la columna PTLKP resulta ser la mejor configuración para este caso, mientras la Petlyuk permanece con los valores más pequeños. De acuerdo a los parámetros deseados en la SVD, para el caso de las observaciones de la Fig. 6 y Fig. 7 se cumple que el número de condición es más pequeño en la configuración de PTLKP y el valor singular mínimo es el mayor en la misma columna. Por esto se espera que para esta mezcla la columna PTLKP ofrezca las mejores propiedades de control.

En la Tabla 5 se reportan los valores mínimos de IAE (para las simulaciones a lazo cerrado) para la mezcla 1, en la cual se puede observar que la columna que presentó los menores valores fue la columna PTLKP, esto fue para los tres componentes: ligero (A: n – butano), intermedio (B: n-pentano) y pesado (C: n – hexano).

Con respecto a la Fig. 8 se puede observar que las tres columnas presentan respuestas oscilatorias, dichas oscilaciones van disminuyendo conforme pasa el tiempo, pero la respuesta de la columna PTLKP muestra un tiempo de estabilización alrededor de 0.35 hrs., que es el menor para las tres columnas. En la Fig. 9 ocurre una situación muy similar a lo antes comentado siendo la columna

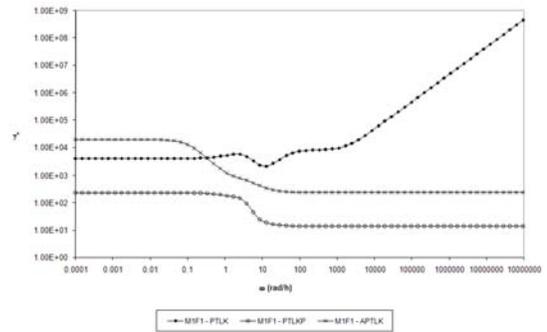


Fig. 6. Número de condición (γ), M1.

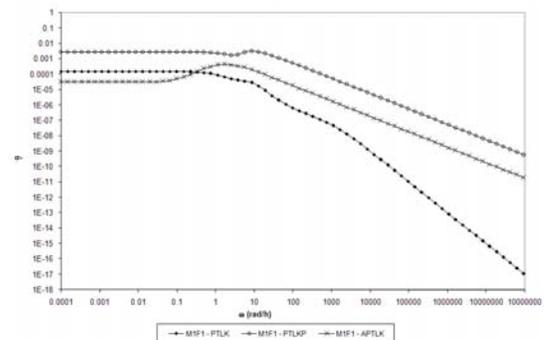


Fig. 7. Valor singular mínimo (σ_m), M1.

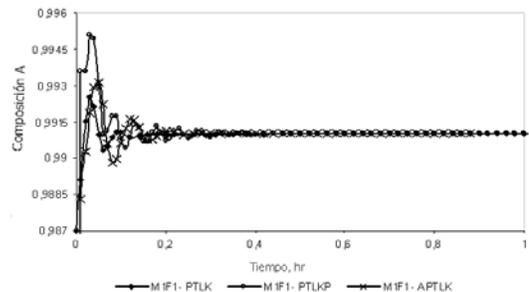


Fig. 8. Cambio de set point para el componente A (M1).

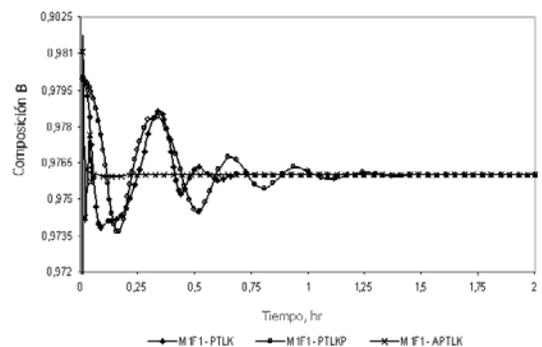


Fig. 9. Cambio de set point para el componente B (M1).

PTLKP la que presenta el mejor desempeño dinámico. En la Fig. 10, la columna PTLKP presenta un sobretiro en el tiempo 0.05 h.; sin embargo, el

Tabla 2. Matriz de funciones de transferencia para la columna PTLK, M1.

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{0.016}{(0.000830802s+1)(0.867304653s+1)} & \frac{0.0156}{0.828s+1} & \frac{-0.4448}{(0.402108168s+1)(0.286546099s+1)} \\ \frac{0.0112}{(0.3323208s+1)(0.245259937s+1)} & \frac{0.0112}{(0.3323208s+1)(0.245259937s+1)} & \frac{0.0072}{0.32914516s+1} - \frac{0.1664}{1.268579447s+1} \\ \frac{-0.0064}{(0.3323208s+1)(2.148732562s+1)} & \frac{-0.0064}{(0.3323208s+1)(2.148732562s+1)} & \frac{0.3616}{1.148937317s+1} \end{pmatrix}$$

Tabla 3. Matriz de funciones de transferencia para la columna PTLKP, M1.

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{-0.0028}{0.101499992s+1} + \frac{0.0448}{0.692677085s+1} & \frac{-0.0076}{0.101499992s+1} + \frac{0.0496}{0.616482606s+1} & \frac{-0.4552}{0.828s+1} \\ \frac{-0.016}{0.0828s+1} + \frac{0.0128}{1.505168s+1} & \frac{-0.0016}{0.0828s+1} + \frac{0.0128}{1.505168s+1} & \frac{0.0028}{0.013s+1} - \frac{0.1592}{1.324332747s+1} \\ \frac{0.0016}{0.2s+1} - \frac{0.0212}{1.035s+1} & \frac{0.002}{0.02s+1} - \frac{0.0216}{1.035s+1} & \frac{0.3824}{1.100064825s+1} \end{pmatrix}$$

Tabla 4. Matriz de funciones de transferencia para la columna APTLK, M1.

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{-0.0536}{0.828s+1} & \frac{-0.0536}{0.828s+1} & \frac{-0.4232}{(0.328997592s+1)(0.229432964s+1)} \\ \frac{-0.0132}{1.674505336s+1} & \frac{-0.0144}{2.8585872s+1} & \frac{0.0164}{0.3657s+1} - \frac{0.0436}{1.549011449s+1} \\ \frac{0.0504}{1.210327489s+1} & \frac{-0.0064}{(0.3323208s+1)(2.148732562s+1)} & \frac{0.408}{1.0602747s+1} \end{pmatrix}$$

Tabla 5. Valores Mínimos de IAE encontrados para M1, un lazo cerrado.

Columna	Componente A			Componente B			Componente C		
	K _C	τ _i	IAE	K _C	τ _i	IAE	K _C	τ _i	IAE
PTLK	300	5	7.995-03	300	1	7.888-03	300	1	8.037-03
PTLKP	300	5	7.978-03	300	10	7.617-03	300	1	8.023-03
APTLK	300	1	8.037-03	300	1	7.970-03	300	1	8.026-03

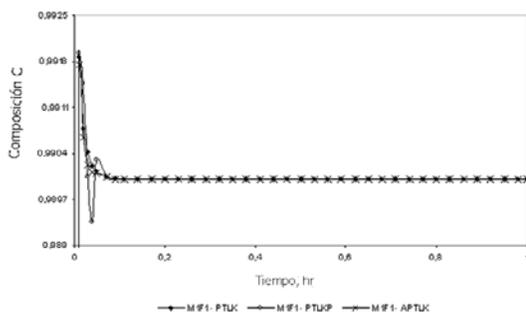


Fig. 10. Cambio de set point para el componente C (M1).

tiempo de estabilización de los componentes es muy similar y para dicha columna se presentó el menor valor de IAE, siendo el tiempo de estabilización para de 0.1 hr. Por lo que se pudo establecer de acuerdo al estudio de SVD y de cambio de set point que la

columna PTLKP es la mejor alternativa para efectuar la separación M1.

A continuación se presenta un estudio similar para cambio de set point para la mezcla M4. En la Tabla 6 se muestran los valores mínimos de IAE correspondientes a M4 resultando la mejor configuración para el componente A la columna PTLKP, la columna APTLK para el componente B y la columna Petlyuk para el componente C.

En la Fig. 11 se puede observar y corroborando con los valores de IAE que la mejor columna fue la columna PTLKP, en la respuesta dinámica ésta presenta un sobretiro más pequeño y un tiempo de estabilización menor en comparación a las otras dos configuraciones (0.3 hrs).

En la Fig. 12 la mejor respuesta la presenta la columna APTLK, ya que se estabiliza casi inmediata, en un tiempo de 0.25 hrs, mientras que las otras configuraciones presentan oscilaciones pero éstas son muy prolongadas, lo cual hace que sus tiempos

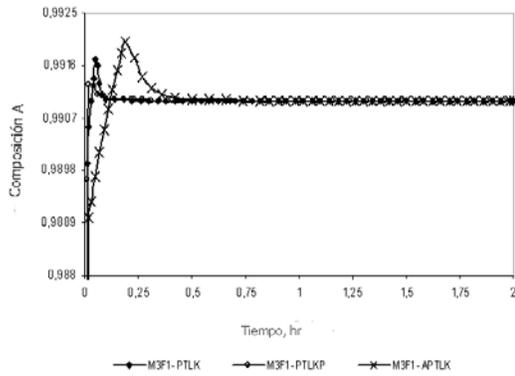


Fig. 11. Cambio de set point para el componente A (M4).

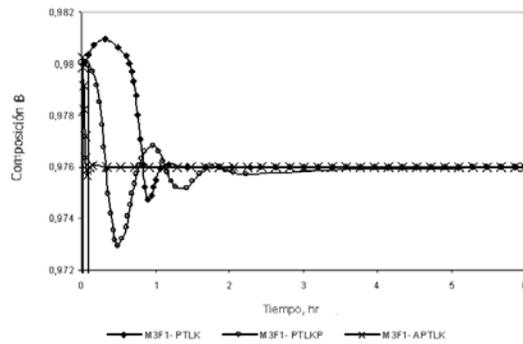


Fig. 12. Cambio de set point para el componente B (M4).

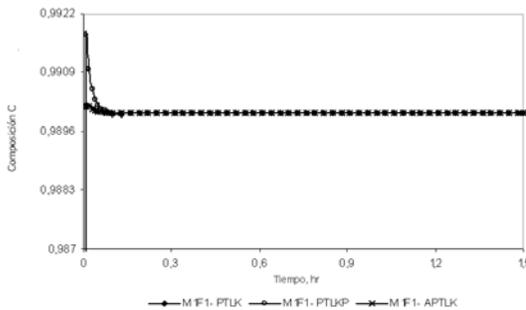


Fig. 13. Cambio de set point para el componente C (M4).

de estabilización sean mucho mayores e incremente el valor del IAE.

En la Fig. 13 se puede observar que las tres columnas tienen un tiempo de estabilización muy similar; sin embargo, la columna Petlyuk es la mejor secuencia estabilizándose en un tiempo de 0.15 hrs. Además presenta un valor de IAE considerablemente menor a las demás y en la respuesta dinámica presenta un ligero sobretiro.

Es importante comentar que en trabajos previos se ha analizado el desempeño dinámico de esquemas térmicamente acoplados para la separación de mezclas ternarias en comparación con sus contrapartes convencionales (por ejemplo en Segovia-Hernández y col., 2002; Segovia-Hernández y col., 2004; Segovia-Hernández y col., 2006b). En aquellos trabajos se ha podido establecer que la presencia de los reciclos mejora el desempeño dinámico de las columnas térmicamente acopladas cuando se compara con los resultados obtenidos para las secuencias de destilación convencionales. En este trabajo se va un paso más allá, al tratar de establecer como las diferentes topologías de esquemas alternativos a la columna Petlyuk influye en las propiedades de control. Los resultados claramente muestran que las columnas alternativas al sistema Petlyuk fueron las que presentaron un mejor desempeño dinámico. Además la presencia de dos paredes divisorias mejora importantemente el desempeño del esquema en comparación con la columna Petlyuk convencional. La Tabla 7 muestra un resumen de las mejores opciones detectado del análisis dinámico para todos los casos de estudio. Basado en las tendencias observadas se puede observar que los mínimos valores de IAE se obtuvieron, en general, para la columna PTLKP y a continuación para la secuencia APTLK. Es decir, las columnas alternativas a la configuración Petlyuk fueron las que presentaron un mejor desempeño dinámico. Por lo que se puede observar que la topología de los sistemas afecta las propiedades de control de las columnas. Y a un mayor número de equipos fraccionadores, el desempeño es mejor.

Tabla 6. Valores Mínimos de IAE encontrados para M4, un lazo cerrado.

Columna	Componente A			Componente B			Componente C		
	K_C	τ_i	IAE	K_C	τ_i	IAE	K_C	τ_i	IAE
PTLK	300	1	5,146E-05	300	6	3,627E-03	300	1	8,283E-06
PTLKP	300	5	4,667E-05	100	110	2,651E-03	300	1	3,828E-05
APTLK	300	1	2,089E-04	300	6	1,943E-04	300	1	9,888E-06

Tabla 7. Resumen de resultados.

MEZCLA						
Componente	M1	M2	M3	M4	M5	M6
A	PTLKP	APTLK	PTLKP	PTLKP	PTLKP	PTLK
B	PTLKP	PTLKP	PTLK	APTLK	PTLKP	APTLK
C	PTLKP	APTLK	APTLK	PTLK	PTLKP	APTLK

Conclusiones

Se ha llevado a cabo un estudio del comportamiento dinámico de tres esquemas de destilación térmicamente acoplados, optimizados en función del mínimo consumo de energía, lo cual asegura que los diseños analizados se encuentran cerca de una región de óptimo global. Los esquemas presentados son variaciones de la columna de pared divisoria, modificando la posición de la pared o incluyendo dos paredes divisorias en una sola coraza.

El análisis a lazo abierto permite determinar las propiedades teóricas de control de los diferentes sistemas considerados, determinando si es posible esperar de estos un buen comportamiento a lazo cerrado. De acuerdo con este análisis, las secuencias de destilación alternativas tienen, en general, mejores propiedades teóricas de control que la columna Petlyuk tradicional, por lo cual se espera presenten mejor comportamiento dinámico bajo un esquema de control. Esto se comprobó con el estudio a lazo cerrado, pues el sistema que en general presentó menor valor de IAE fue el esquema PTLKP para los tres componentes A, B y C. Por otra parte, la dificultad para el control de la columna depende en gran parte del tipo de mezcla que se trabaja, así como de su composición en la alimentación. Por lo que se puede observar que la topología de los sistemas afecta las propiedades de control de las columnas. Y a un mayor número de equipos fraccionadores (o paredes divisorias, en su implementación física), en la columna Petlyuk, el desempeño dinámico es mejor; resultado que no ha sido reportado hasta ahora en la literatura para este tipo de sistemas de separación.

Agradecimientos

Los autores muestran un agradecimiento a la Universidad de Guanajuato, CONACyT y CONCyTEG por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Referencias

Agrawal, R., Fidkowski, Z. (1998). More operable arrangements of fully thermally coupled distillation columns. *AIChE Journal* 44, 2565 - 2568.

- Alcántara - Ávila, R., Cabrera - Ruiz, J., Tamayo - Galván, V.E., Segovia - Hernández, J.G., Hernández, S. (2006). Control properties of alternative schemes to thermally coupled distillation columns for ternary mixtures separation, in distillation and absorption '06. *ICHEME Symposium Series* No. 152, UK, 610 - 618.
- Chen, D. (2002). Relative gain array analysis for uncertain process models. *AIChE Journal* 48, 302 - 310.
- Dünnebier, G., Pantelides, C. (1999). Optimal design of thermally coupled distillation columns. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 38, 162 - 176.
- Finn, A. J. (1993). Consider Thermally Coupled Distillation. *Chemical Engineering Progress*, October 41 - 50.
- Gabor, M., Mizsey, P. (2008). A methodology to determine controllability indices in the frequency domain. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 47, 4807 - 4816.
- Glinos, K., Malone, F. (1988). Optimality regions for complex column alternatives in distillation systems. *Chemical Engineering Research and Design* 66, 229 - 240.
- Gómez - Castro, F.I., Segovia - Hernández, J.G., Hernández, S., Gutiérrez - Antonio, C., Briones - Ramírez, A. (2008). Dividing wall distillation columns: Optimization and control properties. *Chemical Engineering and Technology*, 31, 1246 - 1260.
- Hernández, S., Pereira-Pech, S., Jiménez, A., Rico-Ramírez, V. (2003). Energy efficiency of an indirect thermally coupled distillation sequence. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 81, 1087 - 1091.
- Hernández, S., Jiménez, A. (1996). Design of optimal thermally-coupled distillation systems using a dynamic model. *Transactions of the Institute of Chemical Engineering* 74, 357 - 362.
- Hernández, S., Jiménez, A. (1999a). Design of energy-efficient Petlyuk systems. *Computers and Chemical Engineering* 23, 1005 - 1010.
- Hernández, S., Jiménez, A. (1999b). Controllability analysis of thermally coupled distillation systems. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 38, 3957 - 3963.

- Jiménez, A., Hernández, S., Montoy, F. A., Zavala-García, M. (2001). Analysis of control properties of conventional and nonconventional distillation sequences, *Industrial and Engineering Chemistry Research* 40, 3757-3761.
- Kaibel, G., Schoenmakers, H. (2002). Process synthesis and design in industrial practice, *In Proceedings of ESCAPE – 12*, Elsevier; Amsterdam. The Netherlands, 9 - 20.
- Kaymak, D.B., Luyben, W.L. (2008). Quantitative comparison of dynamic controllability between a reactive distillation column and a conventional multi-unit process. *Computers and Chemical Engineering* 32, 1456 - 1470.
- Kim, Y.H. (2006). A new fully thermally coupled distillation column with postfractionator. *Chemical Engineering and Processing* 45, 254 - 263.
- Klema, V.C., Laub, A.J. (1980). The singular value decomposition: Its computation and some applications. *IEEE Transactions on Automatic Control* 25, 164 - 170.
- Luyben, W.L. (2008a). Design and control of a fully heat-integrated pressure-swing azeotropic distillation system. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 47, 2681 - 2695.
- Luyben, W.L. (2008b). Effect of solvent on controllability in extractive distillation. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 47, 4425 - 4439.
- Malinen, I., Tanskanen, J. (2007) A rigorous minimum energy calculation method for a fully thermally coupled distillation system. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers* 85, 502 -509.
- Muralikrishna, K.; Madhavan, K.P., Shah, S.S. (2002). Development of dividing wall distillation column design space for a specified separation. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers* 80, 155 - 166.
- Papastathopoulou, H. S., Luyben, W.L. (1991). Control of binary sidestream column. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 30, 705 - 713.
- Rong, B.G., Kraslawski, A. (2002). Optimal design of distillation flowsheets with a lower number of thermal couplings for multicomponent separations. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 41, 5716 - 5726.
- Segovia - Hernández, J.G., Hernández, S., Jiménez, A., (2002a). Control behavior of thermally coupled distillation sequences. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers* 80, 783 - 789.
- Segovia - Hernández, J.G., Hernández, S., Jiménez, A. (2002b) Análisis dinámico de secuencias de destilación térmicamente acopladas. *Información Tecnológica* 13, 103 - 108.
- Segovia - Hernández, J.G., Hernández, S., Rico - Ramírez V., Jiménez, A. (2004). A comparison of the feedback control behavior between thermally coupled and conventional distillation schemes. *Computers and Chemical Engineering* 28, 811 - 819.
- Segovia - Hernández, J.G., Hernández, S., Jiménez, A. (2005a). Analysis of dynamic properties of alternative sequences to the Petlyuk column. *Computers and Chemical Engineering* 29, 1389 - 1399.
- Segovia - Hernández, J.G., Hernández, S., Jiménez, A., Femat, R. (2005). Dynamic behavior and control of the Petlyuk scheme via a proportional - integral controller with disturbance estimation. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* 19, 243 - 253.
- Segovia - Hernández, J.G., Hernández - Vargas, E.A., Márquez - Muñoz, J.A., Hernández, S., Jiménez, A. (2005c). Control properties and thermodynamic analysis of two alternatives to thermally coupled distillation systems with side columns. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly* 19, 325 - 332.
- Segovia - Hernández, J.G., Hernández, S., Jiménez, A. (2006a). A short note about energy-efficiency performance of thermally coupled distillation sequences. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 84, 139 - 144.
- Segovia - Hernández, J.G., Bonilla - Petriciolet, A., Salcedo - Estrada, L.I. (2006b) Dynamic analysis of thermally coupled distillation sequences with unidirectional flows for the separation of ternary mixtures. *Korean Journal of Chemical Engineering* 23, 689 - 698.
- Segovia - Hernández, J.G., Hernández - Vargas, E.A., Márquez - Muñoz, J.A. (2007a). Control properties of thermally coupled distillation sequences for different operating conditions. *Computers and Chemical Engineering* 31, 867 - 874.
- Segovia - Hernández, J.G., Hernández, S., Femat, R., Jiménez, A. (2007b). Control of thermally coupled distillation sequences with dynamic estimation of load disturbances. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 46, 546 - 558.
- Tedder, D. W., Rudd, D.F. (1978). Parametric studies in industrial distillation: Part I. Design comparisons. *AIChE Journal* 24, 303 - 315.
- Triantafyllou, C., Smith, R. (1992). The design and optimization of fully thermally coupled distillation columns, *Transactions of the Institute Chemical Engineers* 70, 118-132.
- Vaca, M., Jiménez, A., Monroy -Loperena, A. (2007). Design of Petlyuk distillation columns aided with collocation techniques. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 46, 5365 - 5370.

Wang, S.J., Lee, C.J., Jang, S.S., Shieh, S.S. (2008). Plant-wide design and control of acetic acid dehydration system via heterogeneous azeotropic distillation and divided wall distillation. *Journal of Process Control* 18, 45 - 60.

Wang, S.J., Wong, D.S.H. (2008). Controllability and energy efficiency of a high-purity divided wall column. *Chemical Engineering Science* 62, 1010 - 1025.