

PROPIEDADES DE CONTROL DE ESQUEMAS DE DESTILACION ALTERNATIVOS A LAS SECUENCIAS TERMICAMENTE ACOPLADAS CON COLUMNAS LATERALES PARA LA SEPARACION DE MEZCLAS TERNARIAS

CONTROL PROPERTIES OF ALTERNATIVE DISTILLATION SEQUENCES TO THERMALLY COUPLED SYSTEMS WITH SIDE COLUMNS FOR THE SEPARATION OF TERNARY MIXTURES

J. A. Márquez-Muñoz, J. G. Segovia-Hernández* y S. Hernández

Universidad de Guanajuato, Facultad de Química, Noria Alta S/n, C. P. 36050, Guanajuato Gto., México.

Resumen

En los últimos años se han comenzado a analizar las propiedades de control de las columnas de destilación térmicamente acopladas para la separación de mezclas ternarias. En algunos trabajos se ha establecido que la presencia de reciclos en este tipo de esquemas puede degradar las propiedades dinámicas y por lo tanto convertir estas columnas en sistemas difíciles de controlar. En el presente trabajo se analizan las propiedades de control (mediante la técnica de descomposición en valores singulares a frecuencia cero) de dos secuencias térmicamente acopladas, directa e indirecta, y sus respectivos arreglos alternativos. Los resultados muestran equivalentes consumos de energía y que las columnas térmicamente acopladas presentan mejores propiedades de control que los esquemas con disminución del número de reciclos. Estos resultados indican que el incremento de número de reciclos no necesariamente causa problemas adicionales de control.

Palabras clave: destilación térmicamente acopladas, ahorro de energía, propiedades de control, dinámica de columnas de destilación.

Abstract

Recently, control properties of thermally coupled distillation sequences have been explored for the separation of ternary mixtures. In some papers, it has been established that the recycle streams in the thermally coupled distillation sequences can deteriorate their dynamic behavior. In this work, we explore the controllability properties of two thermally coupled distillation sequences with side columns and two alternate distillation sequences (by using the singular value decomposition technique at zero frequency). The alternate distillation sequences do not have recycle streams and are thermodynamically equivalent to the thermally coupled distillation sequences with side columns (stripper or rectifier columns). The results show equivalent energy consumptions between the two types of distillation sequences, but the theoretical control properties are better in the systems that include recycle streams than in the uncoupled distillation sequences. This result shows that an increment in the number of recycle streams does not necessarily cause additional control problems.

Keywords: thermally coupled distillation, energy savings, control properties, dynamics of distillation columns.

1. Introducción

La destilación es un proceso de separación muy popular, utilizada para realizar el 95% de las separaciones de mezclas de fluidos en la industria química; sin embargo, tiene la desventaja de que consume grandes cantidades de energía; se ha estimado que un 3% de la energía que se consume en el mundo es utilizada por este proceso (Engelien y col., 2003). Una gran

cantidad de trabajos se han efectuado con la finalidad de mejorar la eficiencia energética en los sistemas de destilación, dentro de los que destaca como estrategia prometedora el uso de acoplamientos térmicos, en los cuales la transferencia de calor se realiza por intercambio directo de flujos másicos entre dos columnas. Esto logra dos efectos positivos: a) un equipo de transferencia de calor (rehervidor o condensador) es

Autor para la correspondencia: E-mail: gsegovia@quijote.ugto.mx
Tel. (47) 37320006 Ext. 8142.

eliminado y b) con un adecuado procedimiento de diseño (particularmente con una apropiada selección de los valores de los flujos de interconexión) se pueden lograr ahorros de energía con relación a los esquemas de destilación convencionales. Las secuencias de destilación térmicamente acopladas (SDTA) más estudiadas para la separación de mezclas ternarias son las secuencias con rectificador lateral (STAD; Figura 1a) o con agotador lateral (STAI; Fig. 1b) y el sistema con acoplamiento térmico total (o columna Petlyuk; Fig. 1c). Estudios teóricos (Tedder y Rudd, 1978; Glinos y Malone, 1988; Fidkowski y Krolikowski, 1986; Yeomans y Grossmann, 2000) han mostrado que los esquemas acoplados pueden lograr ahorros en el consumo de energía del orden del 30% en comparación con las secuencias convencionales. Sin embargo, estas configuraciones que pueden alcanzar importantes ahorros, tanto en consumo energético como en capital, no han sido implementadas ampliamente a nivel industrial, sino hasta en los últimos años, debido a problemas potenciales de control (Dünneber y Pantelides, 1999; Kaibel y Schoenmakers, 2002). Los trabajos de Wolff y Skogestad (1995), Abdul-Mutalib y Smith (1998), Hernández y Jiménez (1999), Jiménez y col. (2001), Segovia – Hernández y col. (2002a; 2002b; 2004), entre otros, han mostrado que estos esquemas integrados son controlables; así que, los ahorros de energía predichos pueden ser logrados en la práctica industrial. La búsqueda de ahorros, tanto en energía como en capital y un buen desempeño dinámico, ha permitido el desarrollo de esquemas adicionales a los mostrados en la Fig. 1. Por ejemplo, Agrawal (2000), Rong y Kraslawski (2003), entre otros, han reportado nuevas configuraciones térmicamente acopladas que parecen tener mejores propiedades de control, debido a la disminución del número de interconexiones. Recientemente, Ramírez y Jiménez (2004) han mostrado que algunos esquemas

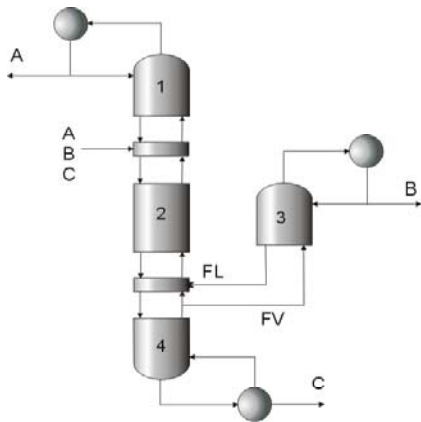
alternativos a las secuencias acopladas con columna lateral (Fig. 2) presentan consumos de energía similares a estas configuraciones complejas. Por ello surge la necesidad de respaldar teóricamente la afirmación de que estos esquemas son controlables, a fin de abrir posibilidades de desarrollo e implementación industrial de estos esquemas. En este trabajo se analiza en forma teórica las propiedades de control de dos esquemas alternativos a las secuencias acopladas con columnas laterales, utilizando la descomposición en valores singulares (DVS) a frecuencia cero.

2. Esquemas alternos a las secuencias acopladas con columna lateral

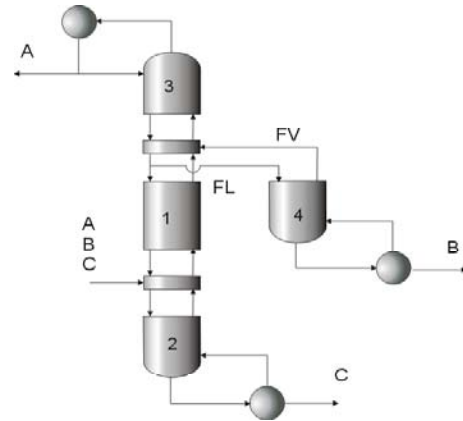
Con el fin de diseñar columnas de destilación más operables, manteniendo un ahorro potencial de energía similar al predicho para las secuencias térmicamente acopladas (para la separación de mezclas ternarias) antes mencionadas, se han propuesto de manera alternativa nuevos arreglos, algunos de ellos sin acoplamientos térmicos, basados en modificaciones a las secuencias ya existentes. Recientemente, Agrawal (2000) ha propuesto dos arreglos que surgen de modificaciones a los sistemas mostrados en la Fig. 1. Estos esquemas son los mostrados en la Fig. 2. El primer arreglo modificado (una secuencia directa con una corriente lateral en la primera columna, SDI; Fig. 2a) elimina la corriente de reciclo de la STAD reproduciendo la sección de agotamiento (sección 4) de la primera columna en la segunda columna, lo cual afecta la estructura de la secuencia original. En la segunda alternativa (una secuencia indirecta con una corriente lateral en la primera columna, SIS; Fig. 2b), la corriente de vapor de la STAI es eliminada y la sección rectificadora de la primera columna (sección 3) es añadida en la segunda columna, afectando el agotador original. Por lo tanto, los nuevos esquemas eliminan la

transferencia de vapor entre las columnas (desaparece el reciclo) y la segunda columna de cada secuencia es transformada en una columna convencional. Las nuevas estructuras parecen proveer esquemas más simples de controlar y operar. Ramírez y

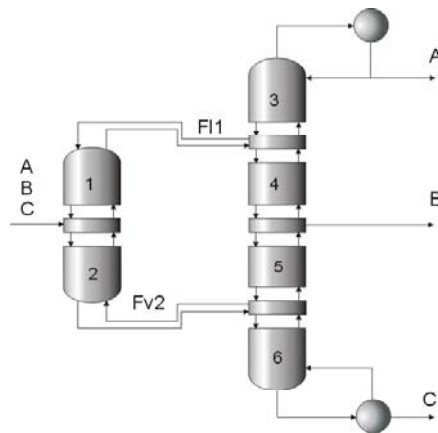
Jiménez (2004) han mostrado que estos nuevos esquemas son equivalentes a las secuencias acopladas con columna lateral, pues exhiben los mismos consumos de energía.



(a) STAD



(b) STAI



(c) Columna Petlyuk

Fig. 1. Secuencias de destilación térmicamente acopladas para la separación de mezclas ternarias.

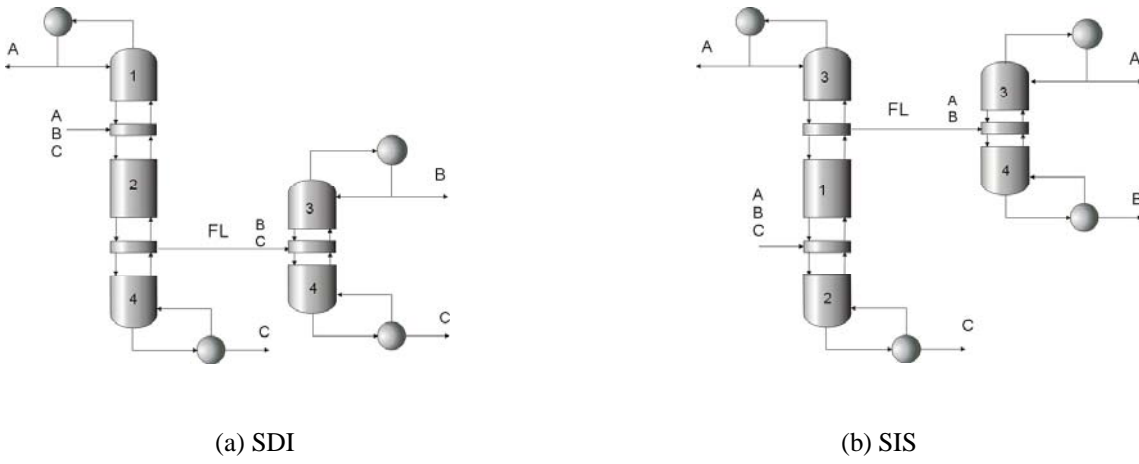


Fig. 2. Esquemas alternos a las secuencias acopladas: (a) alternativa a la STAD; (b) alternativa a la STAI.

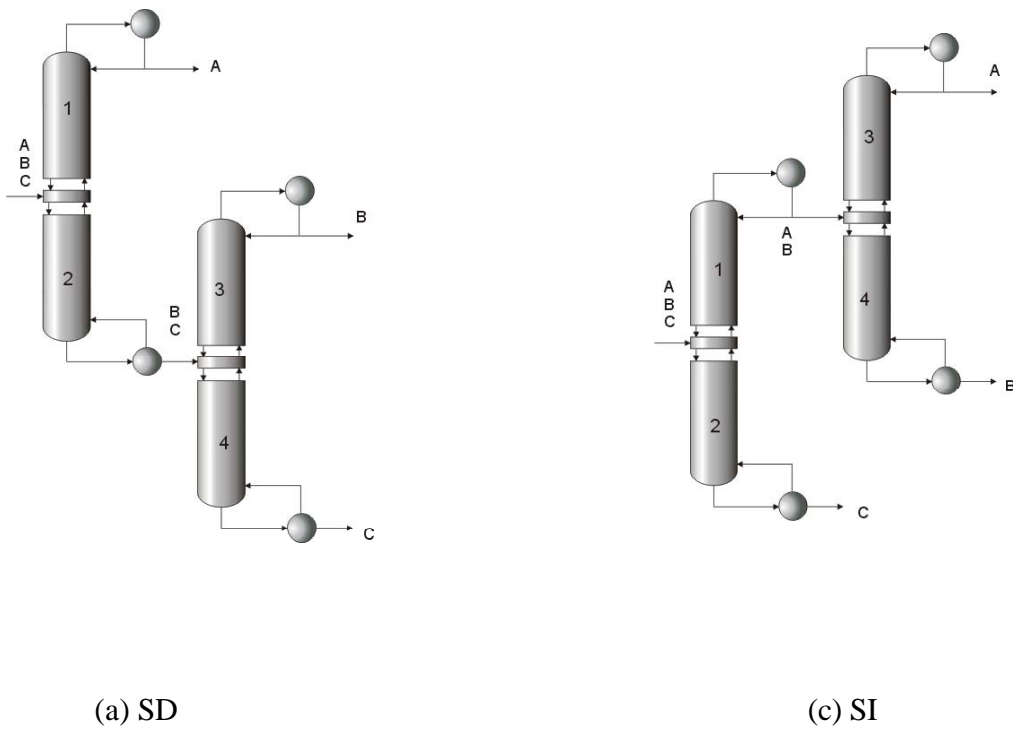


Fig. 3. Secuencias de destilación convencionales para la separación de mezclas ternarias.

3. Diseño de las secuencias

Para el diseño de SDTA se obtuvieron primero sus contrapartes convencionales [una secuencia directa (SD; Fig. 3a) para STAD y una secuencia indirecta (SI; Fig. 3b) para STAI]. Mediante un procedimiento de analogía de secciones, a partir del diseño de las secuencias convencionales, es posible generar la estructura de platos de las secuencias acopladas. Los diseños fueron analizados y optimizados (como función del flujo de interconexión) para la obtención de arreglos con el mínimo consumo de energía mediante simulaciones rigurosas; una descripción más detallada sobre el procedimiento de diseño y optimización se encuentra en Hernández y Jiménez (1996). Los diseños de los nuevos esquemas alternos fueron obtenidos directamente de los arreglos térmicamente acoplados siguiendo una analogía de secciones como se puede ver entre las Figs. 1 y 2. Los nuevos sistemas también fueron sometidos a un procedimiento de optimización para detectar los valores de los flujos de las corrientes laterales que minimizan los consumos de energía. Se debe resaltar que el rango de búsqueda para la optimización de los valores de los flujos laterales está más restringido que para las columnas acopladas debido al balance de materia. Estas limitaciones para las secuencias con columnas laterales han sido explicadas por Glinos y Malone (1985). Más detalles sobre la metodología y optimización de estos arreglos se encuentran en Ramírez y Jiménez (2004).

4. Descomposición en valores singulares (DVS)

Para analizar el efecto de las perturbaciones a un proceso o que tan bien puede lograr cambios de set point, un sistema de control del proceso resuelve implícita o explícitamente un problema algebraico que depende de la matriz de ganancias del

proceso. El sistema de control determina los valores adecuados de las variables manipulables para que las variables controladas logren los valores requeridos. La DVS puede ser utilizada para analizar la robustez de los sistemas a lazo cerrado, establecer que tan bien un proceso responde a diversos casos de estudio (perturbación al proceso, cambios de set point, entre otros) y que tan sensible puede ser en el momento de resolver dichas problemáticas (McAvoy y Braatz, 2003). Respuestas a lazo abierto alrededor del punto de operación que corresponde al del mínimo consumo de energía para cada configuración se obtuvieron utilizando el simulador Aspen Plus 11.1. Las matrices de ganancias (G) fueron obtenidas para cada esquema y fueron sometidas a la DVS (Ec. 1):

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

Aquí $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$, σ_1 valores singulares de $G = \lambda_i^{1/2}(GG^H)$; $V = (v_1, v_2, \dots)$ es la matriz compuesta de los vectores singulares izquierdos, y $W = (w_1, w_2, \dots)$ es la matriz que consiste de los vectores singulares derechos. Los dos parámetros de interés son el valor singular mínimo, σ_* y la relación del máximo al mínimo valor singular, o número condición (Ec. 2):

$$\gamma^* = \sigma^* / \sigma_* \quad (2)$$

El valor singular mínimo es una medida de la invertibilidad del sistema y representa una medida de los problemas potenciales del sistema al operar bajo un control retroalimentado (Klema y Laub, 1980). El número de condición refleja la sensibilidad bajo incertidumbres en los parámetros del proceso y en errores de modelado. Estos parámetros proporcionan información cualitativa de las propiedades teóricas de control. Se espera que las mejores propiedades dinámicas bajo control

retroalimentado sean exhibidas por aquellos sistemas con los mayores valores singulares mínimos y números de condición más bajos. Jiménez y col. (2001) han mostrado la utilidad de aplicar la DVS al comparar propiedades de control de estructuras térmicamente acopladas con sus contrapartes convencionales. Un análisis completo de DVS debe cubrir un intervalo suficientemente amplio de frecuencias. Para este análisis inicial de las propiedades de control de los esquemas alternativos a las configuraciones acopladas con columnas laterales sólo se analizaron los resultados de la DVS a frecuencia cero. Este análisis proporciona información preliminar sobre las propiedades de control de cada sistema alrededor del punto nominal de operación. Un análisis más completo debería de incluir la DVS en todas las frecuencias de interés y presentar respuestas dinámicas a lazo cerrado.

5. Caso de estudio

Se analizaron tres mezclas ternarias con diferentes valores de índice de facilidad de separación, $ESI = \alpha_{AB}/\alpha_{BC}$ (Tedder y Rudd, 1978), con la finalidad de establecer el efecto de la volatilidad relativa de los componentes. Las mezclas seleccionadas fueron: 1. n-pentano, n-hexano y n-heptano ($ESI = 1.04$; M1); 2. n-butano / i-pentano / n-pentano ($ESI = 1.86$; M2); 3. i-pentano / n-pentano / n-hexano ($ESI = 0.47$; M3). Se analizaron dos composiciones para cada mezcla estudiada, (0.40, 0.20, 0.40; F1) ó (0.75, 0.15, 0.75; F2) fracción mol para (A,B,C) respectivamente; esto con la finalidad de reflejar el efecto de la composición del componente intermedio. El flujo total de alimentación fue de 100 lbmol/h. Las purezas especificadas en los productos se tomaron como 98.7, 98 y 98.6 para A, B y C respectivamente. La presión de operación fue seleccionada de tal forma que los condensadores puedan operar con agua de enfriamiento. La correlación de Chao –

Seader fue utilizada para el cálculo de las propiedades termodinámicas.

Resultados y discusión

A continuación se muestran los resultados obtenidos durante el análisis de las columnas acopladas y sus esquemas alternativos mediante la DVS. El estudio se complementa al analizar también las propiedades de control como función de la forma de la curva de optimización (perfil de consumo de energía como función del flujo de interconexión).

6.1 Curvas de optimización como criterio de la controlabilidad de la configuración

A continuación se muestran los perfiles de consumo de energía como función del flujo de interconexión (curva de optimización). En la Fig. 4 se muestran las curvas de optimización para la STAD y SDI (M1, F1). Se observa que la STAD tiene una curva no aguda y un amplio intervalo de operación, teniendo regiones en las cuales el consumo de energía pareciera ser constante. Por el contrario, la SDI muestra una curva estrecha con un intervalo reducido de operación, pudiéndose establecer que este arreglo tendrá problemas de control debido a que cualquier perturbación, por pequeña que sea, alterará severamente el consumo de energía. También se puede observar que si el flujo de interconexión de la SDI disminuye en más de 2 lbmol/h respecto del flujo óptimo, el consumo de energía se incrementará drásticamente; por otro lado, si se aumenta en un incremento mayor de 0.5 lbmol/h el consumo de energía tenderá a dispararse hacia valores muy grandes. Esta situación refleja problemas de operabilidad de la secuencia alternativa y al efectuar el análisis comparativo se ve que la STAD muestra más estabilidad para enfrentar cambios potenciales en las condiciones de operación (lo cual es un reflejo de robustez dinámica). De igual manera que para la

STAD, el análisis de la curva de optimización de la STAI muestra una curva amplia y un intervalo amplio de operación para el flujo de interconexión alrededor del valor óptimo, en el cual no se observa disparo en el valor de la carga térmica. Esta situación permite establecer que la secuencia es robusta para enfrentar cambios potenciales en las condiciones de operación y por lo tanto sus propiedades dinámicas deben ser mejores cuando se compara con la curva de optimización del arreglo SIS, que es muy aguda y presenta un intervalo de operación reducido alrededor del valor óptimo del flujo de interconexión (Fig. 5). Finalmente, el análisis se extendió a las otras dos mezclas, obteniéndose resultados similares.

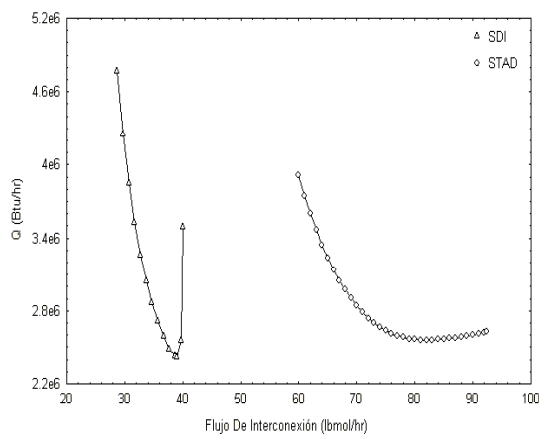


Fig. 4. Perfiles de consumo de energía para la STAD y SDI, caso M1, F1.

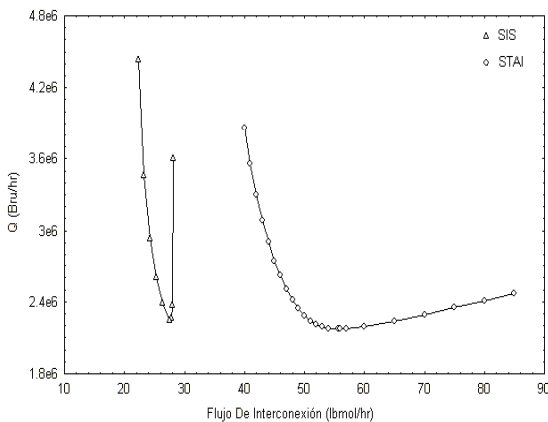


Fig. 5. Perfiles de consumo de energía para la STAI y SIS, caso M1, F1.

6.2 Análisis mediante la DVS

La Tabla 1 muestra los resultados de la DVS para cada una de las secuencias de la Mezcla M1 (caso F1 y F2). Cuando se comparan la STAD con la SDI y la STAI con la SIS se puede observar que las columnas acopladas presentan el valor singular mínimo más grande y el menor de los números de condición. Por lo tanto, se debe esperar que las secuencias acopladas sean más fácilmente controlables que las secuencias alternativas (SDI y SIS): es decir, para un mismo cambio de set point las secuencias acopladas deben presentar el menor esfuerzo de control. Las columnas alternativas muestra el menor de los valores singulares mínimos y el mayor de los números de condición. Esta situación implica que las secuencias SDI y SIS sean más difícilmente controlables en comparación con las otras secuencias. Las secuencias alternativas fueron diseñadas para proveer esquemas más simples de controlar y operar (debido a la disminución de los reciclos) y que tuvieran el mismo consumo de energía que la STAD y la STAI. Por lo tanto, es importante resaltar el hecho de que las columnas acopladas, aún teniendo el acoplamiento térmico, muestran mejores propiedades de control que los arreglos alternos. Por lo tanto, la presencia de reciclos no es causa de deterioro del desempeño dinámico de las secuencias. Resultados similares se obtuvieron para los demás casos analizados (Tablas 2 y 3). Los valores obtenidos mediante la DVS indican que la disminución del número de interconexiones afecta la controlabilidad de los esquemas. También es necesario resaltar el hecho de que los resultados obtenidos mediante la DVS corroboran la idea de que la forma de la curva de optimización, la cual indica que tan sensible o no es el esquema a cambios en las condiciones de operación, puede ser utilizada como un criterio preliminar para intuir las posibles propiedades de control de los arreglos: curvas de optimización muy agudas

y que presentan un intervalo de operación reducido alrededor del valor óptimo del flujo de interconexión indican que la secuencia será más difícil de controlar, cuando se compara con una arreglo que muestra una curva de optimización menos aguda y con un intervalo de operación más amplio alrededor del valor óptimo del flujo de interconexión. En general, los resultados del análisis

muestran que las propiedades dinámicas de las secuencias acopladas no se ven deterioradas por la presencia del reciclo y que los arreglos alternativos, que fueron diseñados para conservar el ahorro de energía de las columnas acopladas en estructuras más simples no son una propuesta que presente mejores propiedades de control.

Tabla 1. Valor singular mínimo y número de condición para las secuencias analizadas con la mezcla M1.

Alimentación F1			Alimentación F2		
Secuencia	σ_*	γ^*	Secuencia	σ_*	γ^*
STAD	29.3	80.9	STAD	1.8	1984
SDI	0.0603	16356.24	SDI	0.6	3231.5
STAI	80.4	12.2	STAI	1.7	2483
SIS	0.1	29392	SIS	0.0006	181674

Tabla 2. Valor singular mínimo y número de condición para las secuencias analizadas con la mezcla M2.

Alimentación F1			Alimentación F2		
Secuencia	σ_*	γ^*	Secuencia	σ_*	γ^*
STAD	41.4	125.8	STAD	4.4	851.9
SDI	0.1	8166.1	SDI	2	1603.2
STAI	120.8	8.9	STAI	7.5	1328.8
SIS	0.1	98594	SIS	0.0018	273873.7

Tabla 3. Valor singular mínimo y número de condición para las secuencias analizadas con la mezcla M3.

Alimentación F1			Alimentación F2		
Secuencia	σ_*	γ^*	Secuencia	σ_*	γ^*
STAD	21.7	85.8	STAD	5.8	977.8
SDI	1.7	4064.2	SDI	0.1	69816
STAI	257.5	34.57	STAI	3	1401.3
SIS	0.04	10315.63	SIS	0.02	17057

Conclusiones

Los resultados indican que el aumento del número de interconexiones no afecta la controlabilidad en los arreglos acoplados. Mediante el análisis utilizando, la DVS, se puede establecer que las secuencias térmicamente acopladas tienen mejores propiedades de control respecto a las secuencias alternas y convencionales; además, de tener ahorros de energía considerables respecto a los esquemas convencionales. Para las tres mezclas analizadas se observa como en el análisis comparativo los esquemas acoplados tienen los mayores valores singulares mínimos y los menores números de condición, siendo los esquemas acoplados mejores desde el punto de vista de robustez del control. Cuando se analizan los esquemas alternos, el análisis mediante DVS muestra que dichos arreglos no presentan buenas propiedades de control. Estos resultados se pueden atribuir a la unidireccionalidad del flujo de conexión, que está restringido por el balance de materia, siendo esta topología de los esquemas alternos la causa de los problemas de controlabilidad. En cambio, en los esquemas acoplados la presencia de reciclos másicos favorece las propiedades dinámicas de las columnas térmicamente acopladas. También se comprueba que la forma de las curvas de optimización se puede utilizar como criterio introductorio para tener una idea previa de cómo puede ser el control del esquema a estudiar. Una heurística puede ser establecida: conforme la curva de optimización sea más aguda, el esquema no presentará buenas propiedades de control. En este trabajo, dicha heurística es consistente con los resultados obtenidos mediante la DVS. En general, los resultados indican que la presencia de flujos de interconexión mejora las propiedades dinámicas de los esquemas complejos y este análisis es consistente con aquellos obtenidos por Segovia – Hernández y col. (2005) para el

estudio de esquemas alternativos a la columna Petlyuk con disminución de reciclos.

Agradecimientos

A PROMEP y a la Universidad de Guanajuato por el apoyo recibido para la realización de este trabajo.

Referencias

- Abdul Mutalib, M. I. y Smith, R. (1998). Operation and control of dividing wall distillation columns. Part I: Degrees of freedom and dynamic simulation. *Transactions of IChemE*. 76, 308–318.
- Agrawal, R. (2000). Thermally coupled distillation with reduce number of intercolumn vapor transfer. *AIChE Journal*. 46, 2198 - 2210.
- Dünnebier, G. y Pantelides, C. (1999). Optimal design of thermally coupled distillation columns. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 38, 162 – 176.
- Engelien, H. K. Larsson, T. y Skogestad, S. (2003). Implementation of optimal operation for heat integrated distillation columns. *Transactions of IChemE*. 81, 277 - 281.
- Fidkowski, Z. y Krolikowski, L. (1986). Thermally coupled systems of distillation columns: optimization procedure. *AIChE Journal*. 32, 537 - 546.
- Glinos, K. y Malone, F. (1988). Optimality regions for complex column alternatives in distillation systems. *Chemical Engineering Research and Design*. 66, 229 - 240.
- Hernández, S. y Jiménez, A. (1996). Design of optimal thermally coupled distillation systems using a dynamic model. *Transactions of IChemE*. 74, 357 - 362.
- Hernández, S. y Jiménez, A. (1999). Controllability analysis of thermally coupled distillation systems. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 38, 3957 - 3963.
- Jiménez, A., Hernández, S. Montoy, F.A. y Zavala-García, M. (2001). Analysis of control properties of conventional and nonconventional distillation sequences.

- Industrial and Engineering Chemistry Research*. 40, 3757–3761.
- Kaibel, G. y Schoenmakers, H. (2002). Process synthesis and design in industrial practice. En: Proceedings ESCAPE – 12 (J. Grievnik y J. Schijndel, eds.), Pp. 9–22. Elsevier, The Netherlands.
- Klema, V. C. y Laub, A. J. (1980). The Singular Value Decomposition: Its Computation and some Applications. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 25, 164-175.
- McAvoy T. y Braatz, R. D. (2003). Controllability of processes with large singular values. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 42, 6155 – 6165.
- Ramírez, N. y Jiménez, A. (2004). Two alternatives to thermally coupled distillation systems with side columns. *AIChE Journal*. 50, 2971 - 2975.
- Rong, B.G. y Kraslawski, A. (2003). Partially thermally coupled distillation systems for multicomponent separations. *AIChE Journal*. 49, 1340 - 1347.
- Segovia – Hernández, J.G., Hernández, S. y Jiménez, A. (2002a). Control behaviour of thermally coupled distillation sequences. *Transactions of IChemE*. 80, 783 - 789.
- Segovia – Hernández, J.G., Hernández, S. y 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. y 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. y Jiménez, A. (2005). Analysis of dynamic properties of alternative sequences to the Petlyuk column. *Computers and Chemical Engineering*. 29, 1389-1399.
- Tedder, D. W. y Rudd, D. F. (1978). Parametric studies in industrial distillation: Part I. Design Comparisons. *AIChE Journal*. 24, 303 - 315.
- Wolff, E. A. y Skogestad, S. (1995). Operation of integrated three – product (Petlyuk) distillation columns. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 34, 2094 - 2103.
- Yeomans, H. y Grossmann, I. E. (2000). Optimal design of complex distillation columns using rigorous tray – by – tray disjunctive programming models. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 39, 4326 - 4335.