

DISEÑO Y CONTROL DE SECUENCIAS DE DESTILACION TERMICAMENTE ACOPLADAS

DESIGN AND CONTROL OF THERMALLY COUPLED DISTILLATION SEQUENCES

L. D. Banda-Belmonte y S. Hernández-Castro*

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

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis sobre el diseño y el control de secuencias de destilación térmicamente acopladas a columnas auxiliares. Se corrobora que el consumo de energía depende fuertemente del flujo de interconexión entre las columnas de la secuencia integrada. En cuanto a las respuestas dinámicas, se obtiene que éstas se pueden mejorar de manera notable operando la secuencia de destilación con acoplamiento térmico con flujos de interconexión por arriba del valor óptimo. Por lo tanto, se pueden mejorar significativamente las respuestas dinámicas a expensas de operar a un consumo de energía ligeramente superior al óptimo.

Palabras clave: destilación térmicamente acoplada, control, respuestas dinámicas.

Abstract

In this work we present an analysis of the design and control of thermally coupled distillation sequences with side columns. It is found that the energy consumption depends strongly on the interconnecting stream between the columns in the integrated distillation sequence. Regarding the dynamic responses, it is concluded that these can be improved by operating the sequence with a flow of interconnection above the optimum value. As a result, the dynamic responses can be improved significantly through the operation at energy demands slightly different from the optimum.

Keywords: thermally coupled distillation, control, dynamic responses.

1. Introducción

La destilación sigue 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. 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 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 TCDS-SR, Fig. 1, la secuencia de destilación térmicamente acoplada a un agotador lateral TCDS-SS, 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 Fig. 4, en la separación de mezclas ternarias con bajo o alto contenido de componente intermedio.

*Autor para la correspondencia: E-mail: hernasa@quijote.ugto.mx
Tel/Fax: (47) 37320006 Ext. 8142 y 8101

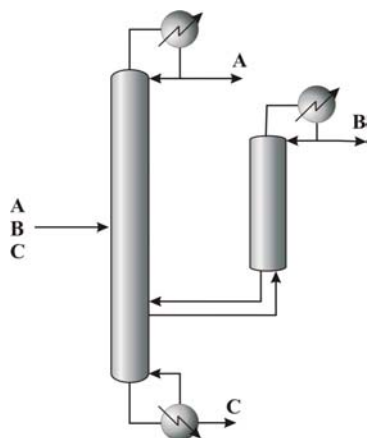


Fig. 1. Secuencia de destilación térmicamente acoplada a rectificador lateral (TCDS-SR).

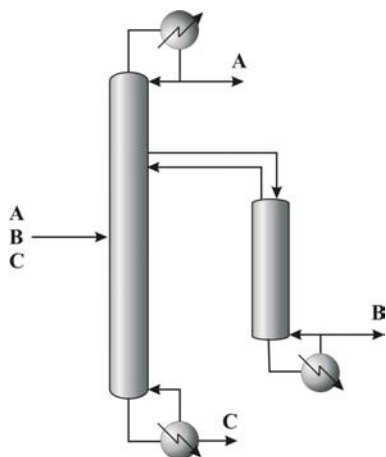


Fig. 2. Secuencia de destilación térmicamente acoplada a agotador lateral (TCDS-SS).

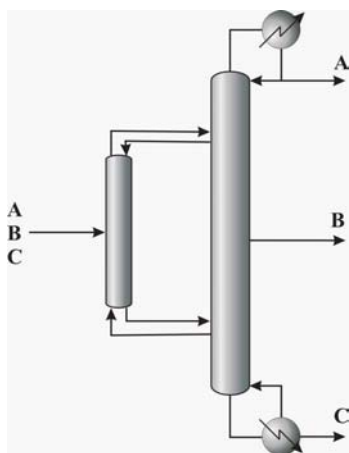
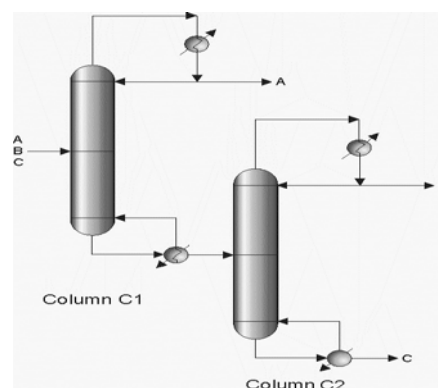
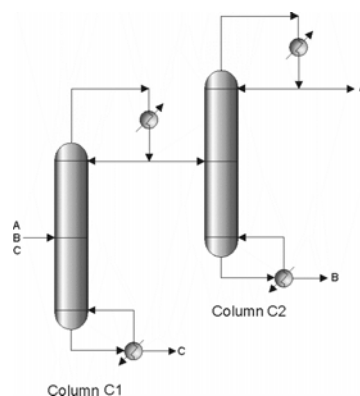


Fig. 3. Secuencia Petlyuk.

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 mostrada en la Fig. 4a en términos del perfil de concentración del componente intermedio (B) en la primera columna de la secuencia, Fig. 5, 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) Secuencia convencional directa.



(b) Secuencia convencional indirecta.

Fig. 4. Secuencias de destilación convencionales para separar una mezcla ternaria.

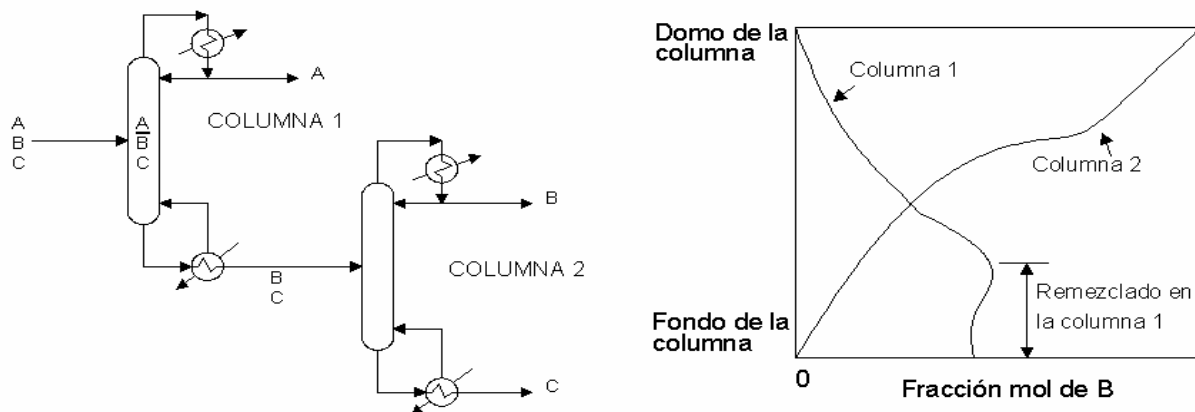


Fig. 5. Remezclado en la secuencia convencional directa.

Para el caso de las secuencias de destilación con acoplamiento térmico a columnas laterales, Figs. 1 y 2, la corriente lateral que se extrae de la primera columna y se alimenta a la segunda, se extrae de la máxima concentración en el perfil del componente B, con lo cual se elimina el efecto del remezclado sobre el consumo de energía. Para el caso de la columna Petlyuk, la corriente lateral de la segunda columna se extrae del máximo en la concentración del componente intermedio B, eliminando así el efecto del remezclado en la demanda energética de la columna principal.

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, (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).

Estas razones motivaron 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), 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 en verdad no eran más difíciles de controlar que los esquemas convencionales, más aún 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., 2002); (Serra y col., 2003), entre otros).

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 formales de optimización (Dunnebir 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 controladores novedosos (Segovia-Hernández y *col.*, 2003).

Finalmente el propósito fundamental de este trabajo es el análisis de la interacción diseño control en las secuencias de destilación acopladas térmicamente a columnas laterales, Figs. 1 y 2, de tal forma que se pueda inferir como cambian las propiedades dinámicas de las secuencias a medida que se modifica el diseño inicial.

2. Diseño y optimización de secuencias de destilación térmicamente acopladas

Los métodos de diseño y optimización de las secuencias de destilación convencionales son bien conocidos (Seader y Henley, 1998), desde los métodos cortos para un estudio preliminar hasta los métodos rigurosos para propósitos de optimización. En el caso de secuencias de destilación, aún para el caso de secuencias complejas (Alatqi y Luyben, 1985), hasta el 80% del costo total anual se debe a los servicios, representando el rubro más importante.

Las etapas de separación en las secuencias de destilación térmicamente acopladas se obtienen a partir de las secuencias de destilación convencionales; es decir, el diseño en cuanto a número de platos para la TCDS-SR, Fig. 1, se obtiene partiendo del diseño preliminar de la secuencia de destilación convencional directa, Fig. 4a, y la TCDS-SS, Fig. 2, se puede generar partiendo del diseño de la secuencia de destilación convencional indirecta, Fig. 4b. Por ejemplo, para el diseño de la TCDS-SR, en la Fig. 6 se muestran las secciones de platos de la secuencia convencional directa, la primera columna tiene las secciones de rectificación y agotamiento 1 y 2 respectivamente, en la

segunda columna de destilación se tienen las secciones de separación 3 y 4. Partiendo de las secciones de las dos columnas de la secuencia convencional se genera el esquema con acoplamiento térmico TCDS-SR, en la cual la columna principal tendrá las secciones 1, 2 y 4 de las columnas convencionales y la columna auxiliar (rectificador) tendrá un número de etapas equivalentes a la sección 3.

Como puede notarse en esta etapa del diseño se conoce la TCDS-SR en cuanto a secciones de platos, pero se introdujo un grado de libertad adicional asociado al flujo de vapor que se extrae de la columna principal y se alimenta al fondo del rectificador lateral. Ha sido demostrado que este flujo de interconexión de vapor está asociado al consumo energético de la secuencia, de hecho es necesario variar este flujo de interconexión hasta que se detecta el diseño con el menor consumo de energía (Hernández y Jiménez, 1996). El diseño en cuanto a etapas de separación de la TCDS-SS se puede obtener en base a la secuencia convencional indirecta como se indica en la Fig. 7, en forma análoga se introduce un grado de libertad más que está asociado con el flujo de líquido que se extrae de la primera columna y se alimenta al domo de la columna agotadora lateral. Nuevamente el flujo de líquido se varía hasta que se detecta el mínimo consumo energético de la secuencia (Hernández y Jiménez, 1996).

En general el consumo de energía depende fuertemente del flujo de vapor o líquido (TCDS-SR, TCDS-SS) que va de la primera columna a la segunda, por lo tanto, se puede inferir que este grado de libertad afecta las propiedades dinámicas de las secuencias de destilación con acoplamiento térmico.

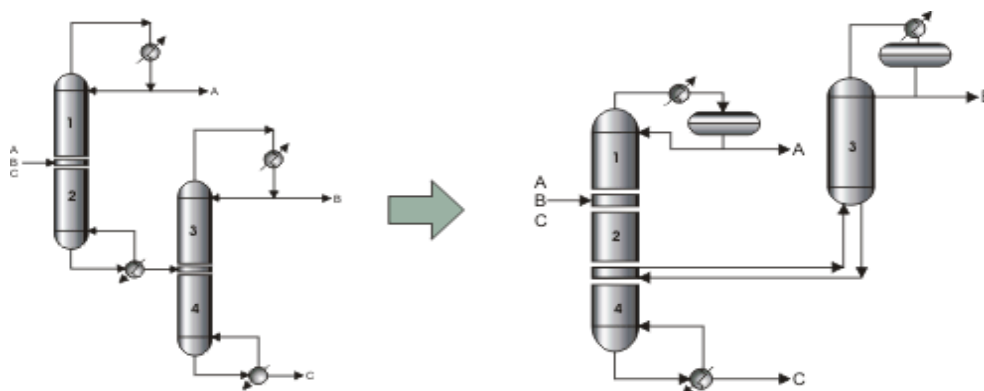


Fig. 6. Diseño de la TCDS-SR a partir de la secuencia convencional directa.

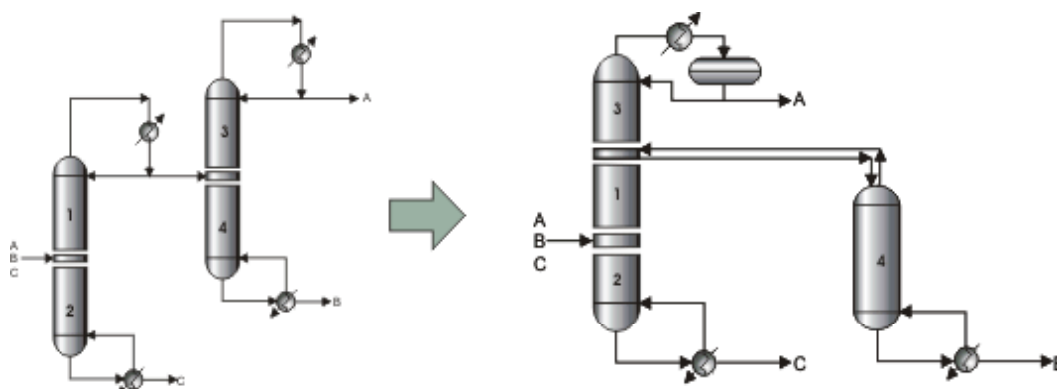


Fig. 7. Diseño de la TCDS-SS a partir de la secuencia convencional indirecta.

3. Análisis dinámico de las secuencias de destilación integradas

Teniendo el diseño optimizado de las secuencias de destilación TCDS-SR y TCDS-SS se procedió a estudiar sus respuestas dinámicas a lazo cerrado bajo la acción de controladores proporcionales integrales. Se consideraron tres variables a controlar, las purezas de los productos A, B y C indicadas en las Figs. 1 y 2. Se usaron como variables manipulables los reflujo y las cargas térmicas suministradas a los rehervidores. De aspectos prácticos de control, se asoció la composición de los destilados con los reflujo y las composiciones de productos de fondos con las cargas térmicas suministradas a los rehervidores. Se estudiaron cambios en las

composiciones de referencia o set points y perturbaciones en la composición de la alimentación. Los controladores proporcionales integrales se sintonizaron usando la técnica de Cohen y Coon (Stephanopoulos, 1984). Las simulaciones se realizaron usando los simuladores de procesos Aspen Plus y Aspen Dynamics 11.1TM.

4. Caso de estudio

Se estudió la separación de una mezcla ternaria de hidrocarburos (A=n-pentano, B=n-hexano y C=n-heptano, componentes típicos en las mezclas de la industria petroquímica) para dos alimentaciones, una con bajo contenido de componente intermedio (A=0.45, B=0.1, C=0.45) y la

otra con alto contenido de componente intermedio ($A=0.15$, $B=0.7$, $C=0.15$). Estas alimentaciones se consideran representativas para el estudio de secuencias de destilación con acoplamiento térmico, ya que en estudios previos Tedder y Rudd (1978), mediante un estudio paramétrico, encontraron que el máximo ahorro en el costo total de operación se obtenía cuando la concentración del componente intermedio en la alimentación era baja y disminuía conforme se incrementaba la cantidad de ese componente en la alimentación.

Se obtuvo el diseño y se optimizó para el caso de las dos secuencias de destilación térmicamente acopladas a columnas laterales (TCDS-SR y TCDS-SS). En cuanto al estudio del efecto del reciclo en las respuestas dinámicas, se analizaron tres diseños para cada secuencia integrada: el diseño óptimo y dos diseños con consumos energéticos superiores al óptimo que se les denomina abajo y arriba del óptimo. Estos tres diseños están asociados a tres valores diferentes de flujos de interconexión.

5. Discusión de resultados

La Fig. 8 muestra la optimización del consumo de energía para la TCDS-SR, separando la alimentación con bajo contenido del componente intermedio. Como se puede notar en la figura el consumo de energía depende fuertemente del flujo de interconexión de vapor. En esta figura se puede apreciar que el consumo óptimo de energía es de 2,710,000 Btu/h y se obtiene cuando el flujo de interconexión es de 135 lb-mol/h; además, se observa que el consumo de energía crece más rápidamente para flujos de vapor menores al óptimo que para valores mayores. De aquí se puede inferir que un sistema que opere con un flujo de vapor de interconexión mayor al óptimo presentará un control más noble que si se opera a un flujo de interconexión inferior al valor óptimo ya que una perturbación podrá

mover al sistema hacia altos consumos de energía y por lo tanto a desviaciones considerables en las válvulas de control asociadas al reflujo y al flujo de vapor de calentamiento suministrado al rehervidor. En general, la optimización energética de la secuencia TCDS-SS presenta un comportamiento muy similar al de la Fig. 8. Las curvas de optimización para ambos tipos de secuencias de destilación térmicamente acopladas, siguen el patrón reportado en la Fig. 8; sin embargo, en algunos casos las curvas de optimización son muy cerradas, con lo cual se puede esperar problemas potenciales de control.

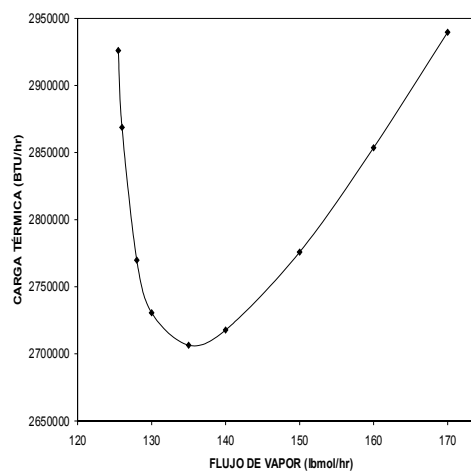


Fig. 8 Optimización del consumo de energía para la TCDS-SR.

Como se mencionó anteriormente se analizaron adicionalmente dos diseños con consumos de energía superiores al mínimo: uno con flujo de interconexión de vapor de 126 lb-mol/h y consumo de energía de 2,800,000 Btu/h (por debajo del óptimo) y el otro diseño con flujo de interconexión y carga térmica de 170 lb-mol/h y 2,910,000 Btu/h respectivamente (por arriba del óptimo).

En la Fig. 9 se muestran las respuestas dinámicas a lazo cerrado de la composición del producto A para cuando se impone un

cambio negativo de set point de A de 0.987 a 0.976, como puede notarse las respuestas en los tres diseños son oscilatorias; sin embargo, en el caso del diseño arriba del óptimo la respuesta es ligeramente mejor ya que las oscilaciones son menores y el tiempo en que se estabiliza también. El diseño abajo y en el óptimo presentan unas respuestas dinámicas muy similares. Cuantitativamente las respuestas se compararon en términos de la integral absoluta del error (IAE), obteniéndose valores de 0.0029, 0.0022 y 0.0033 para los diseños óptimo, arriba del óptimo y debajo del óptimo respectivamente. Es claro que considerando los valores de IAE, la respuesta más aceptable corresponde al diseño operando con un flujo de vapor superior al óptimo. En este sentido se sabe que la técnica del IAE puede indicar de

manera cuantitativa cual es la mejor respuesta, lo cual se corrobora por inspección de las respuestas dinámicas a lazo cerrado.

La Fig. 10 corresponde a las respuestas dinámicas del componente A cuando se impone una perturbación de aumento del 2% en la composición de A en la alimentación y una disminución del 1% en los componentes B y C respectivamente. En esta figura se nota como nuevamente la respuesta dinámica del diseño arriba del óptimo es mejor, alcanzando más rápido la estabilización y con menores oscilaciones. Consecuentemente dicha respuesta presenta un valor de IAE más bajo que los otros dos diseños.

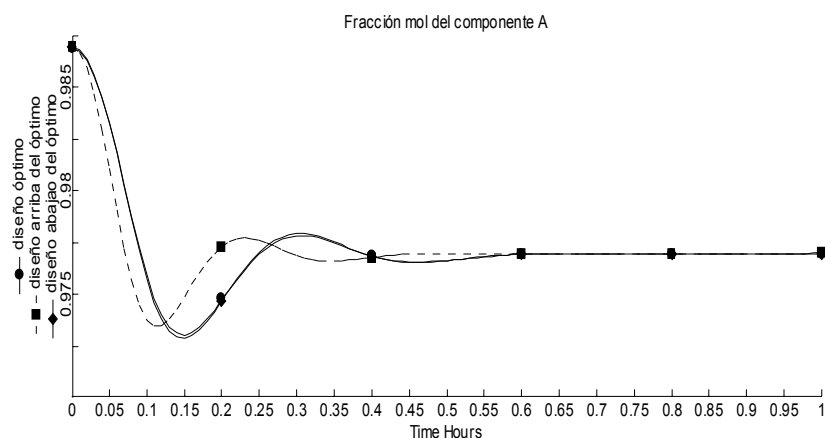


Fig. 9. Respuesta dinámica de la TCDS-SR para un cambio negativo de set point en el componente A.

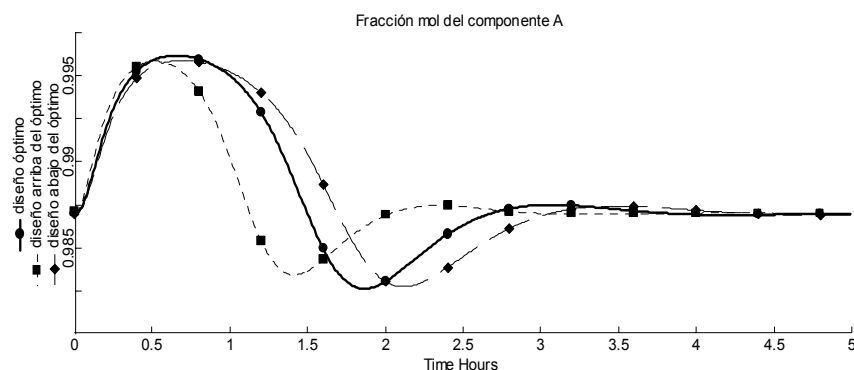


Fig. 10. Respuesta dinámica de la TCDS-SR para una perturbación en la composición del componente A en la alimentación.

En general en el análisis de los demás casos de estudio se corroboró el hecho de que el diseño con un flujo de interconexión superior al óptimo presentaba las mejores respuestas dinámicas a lazo cerrado.

Conclusiones

Se estudió el efecto del flujo de interconexión en secuencias de destilación con acoplamiento térmico, se corrobora el hecho de que el consumo de energía está influenciado fuertemente por dicha variable y que el consumo de energía es más sensible a medida que el flujo de interconexión es menor que el flujo óptimo. En cuanto a las propiedades dinámicas de las secuencias bajo la acción de controladores retroalimentados, tipo proporcional e integral, se encuentra que para los casos de estudio presentados, las respuestas dinámicas son mejores cuando se opera a flujos de interconexión superiores al correspondiente al mínimo consumo de energía. Por lo tanto, se pueden lograr mejores propiedades de control a expensas de incrementar el flujo de la corriente de interconexión y como consecuencia de un aumento en el consumo de energía, desde luego este aumento en el flujo de interconexión deberá de hacerse de tal forma que la secuencia de destilación con acoplamiento térmico siga siendo más eficiente que la secuencia de destilación convencional correspondiente.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo económico por parte del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Guanajuato (CONCyTEG) para el desarrollo de este proyecto.

Referencias

- Alatiqi, I. M. y Luyben, W. L. (1985). Alternative distillation configurations for separating ternary mixtures with small concentration of intermediate in the feed. *Industrial Engineering Chemical Process Design and Development* 24, 500-506.
- Dunneber, G. y Pantelides, C. (1999). Optimal design of thermally coupled distillation columns. *Industrial Engineering Chemical Research* 38, 162-176.
- Finn, A. J. (1993). Consider thermally coupled distillation. *Chemical Engineering Progress*, Oct 41-45.
- Glinos, K. y Malone, F. (1988). Optimality regions for complex column alternatives in distillation systems. *Chemical Engineering Research Design* 66, 229-240.
- Hernández, S., Pereira-Pech, S., Jiménez, A. y Rico-Ramírez, V. (2003). Energy efficiency of an indirect thermally coupled distillation sequence. *The Canadian Journal Chemical Engineering*, in press.
- Hernández, S. y Jiménez, A. (1996). Design of optimal thermally-coupled distillation systems using a dynamic model. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers* 74, 357-362.
- Hernández, S. y Jiménez, A. (1999a). Design of energy-efficient petlyuk systems. *Computational Chemical Engineering* 23, 1005-1010.
- Hernández, S. y Jiménez, A. (1999b). Controllability analysis of thermally coupled distillation systems. *Industrial Engineering Chemical 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 Engineering Chemical Research* 40, 3757-3761.
- Kaibel, G. (2002). Process synthesis and design in industrial practice. *European Symposium on Computer Aided Process Engineering* 12, 9-22, Ed. Elsevier, Holanda.

- Rong, B. G. y Kraslawski, A. (2002). Optimal design of distillation flowsheets with a lower number of thermal couplings for multicomponent separations. *Industrial Engineering Chemical Research* 41, 5716-5726.
- Seader, J. D. y Henley, E. (1997). *Process Separation Principles*. John Wiley and Sons, EUA.
- Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S. y Jiménez, A. (2002). Control behaviour of thermally coupled distillation sequences. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers* 80, 783-789.
- Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., Femat, R. y Jiménez, A. (2003). Dynamic control of a petlyuk column via proportional-integral action with dynamic estimation of uncertainties. *European Symposium on Computer Aided Process Engineering –13*, (A. Kraslawski e I. Turunen, eds), Pp 515-520, Elsevier, Holanda.
- Serra, M., Espuña, A. y Puigjaner, L. (2003). Controllability of different multicomponent distillation arrangements. *Industrial Engineering Chemical Research* 42, 1773-1782.
- Stephanopoulos, G. (1984). *Chemical Process Control. An Introduction to Theory and Practice*. Prentice Hall Inc., EUA.
- Tedder, D. W. y Rudd, D.F. (1978). Parametric studies in industrial distillation: Part I. design comparisons. *AIChE Journal* 24, 303-315.
- Triantafyllou, C. y Smith, R. (1992). The design and optimisation of fully thermally coupled distillation columns. *Transation of the Institute Chemical Engineering* 70, 118-132.