

# ANALISIS DINAMICO DE SECUENCIAS DE DESTILACION TERMICAMENTE ACOPLADAS

J.G. Segovía-Hernández (1), S. Hernández\* (2) y A. Jiménez (1)

(1) Ins. Tecnológico de Celaya, Depto. de Ingeniería Química, Av. Tecnológico y García Cubas s/n, 38010 Celaya, Gto. - México

(2) Univ. de Guanajuato, Fac. de Química, Noria Alta s/n, 36050 Guanajuato, Gto. - México

\* Autor a quien debe ser dirigida la correspondencia

## RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis dinámico a lazo cerrado de tres secuencias de destilación térmicamente acopladas (Petlyuk, secuencias térmicamente acoplada directa e indirecta) y las secuencias convencionales directa e indirecta para la separación de mezclas ternarias. Se analizan las respuestas dinámicas para tres lazos de control retroalimentados cuando se realizan cambios en las perturbaciones en la composición de la alimentación (set points). En el caso de las secuencias convencionales, la secuencia indirecta presentó las mejores respuestas en cuanto a tiempos de estabilización y desviaciones de las perturbaciones. Para las secuencias térmicamente acopladas, la columna Petlyuk mostró las mejores respuestas dinámicas. Se concluye que al comparar los resultados para las dos clases de secuencias, se observa que los sistemas con acoplamiento térmico presentaron mejores propiedades de control que las secuencias de destilación convencionales.

## DYNAMIC ANALYSIS OF THERMALLY COUPLED DISTILLATION SEQUENCES

### ABSTRACT

This study presents a closed loop dynamic analysis of three thermally coupled distillation sequences (Petlyuk system, sequences with side rectifiers, and sequences with side strippers) and conventional direct and indirect sequences for the separation of ternary mixtures. The responses for three feedback control loops were analyzed when set point changes were implemented. For conventional sequences, the indirect sequence showed the best responses, with lower stabilization times and smaller deviations of set points. The Petlyuk column showed the best dynamic behavior for thermally coupled distillation sequences. Based on comparisons of the two types of sequence it is observed that systems with thermal coupling exhibited better control properties than sequences based on conventional distillation.

*Keywords: distillation sequence, thermally coupled distillation, dynamic columns, distillation control*



## INTRODUCCIÓN

La separación de mezclas ternarias mediante secuencias de destilación constituye un problema que ha recibido bastante atención en el área de diseño de procesos. Además de las secuencias convencionales directa e indirecta para la separación de una mezcla ternaria, pueden usarse otras adaptaciones conocidas como secuencias térmicamente acopladas; por ejemplo la secuencia térmicamente acoplada directa (STAD, Figura 1a), secuencia térmicamente acoplada indirecta (STAI, Figura 1b) y la columna Petlyuk (Figura 1c). Estudios teóricos han mostrado que estas secuencias de destilación pueden presentar ahorros de energía hasta de 30%, en comparación con las secuencias convencionales (Tedder y Rudd, 1978; Alatiqi y Luyben, 1985; Glinos y Malone, 1988; Fidkowski y Krolikowski, 1991; Finn, 1993; Yeomans y Grossmann, 2000). Hernández y Jiménez (1996; 1999a) han presentado el uso de estrategias de optimización que detectan los diseños térmicamente acoplados con un consumo mínimo de energía. A pesar de este incentivo, los esquemas acoplados no son comúnmente utilizados en la práctica industrial debido a problemas potenciales de control (Dunnebiér y Pantelides, 1999). Los trabajos de Wolff y Skogestad (1995), Abdul-Mutalib y Smith (1998), Hernández y Jiménez (1999b) y Jiménez et al. (2001) han contribuido a comprender las propiedades dinámicas de las secuencias térmicamente acopladas. En este trabajo se presenta un análisis comparativo de las propiedades de control entre las secuencias térmicamente acopladas y las secuencias convencionales de destilación.

## DISEÑO DE LAS SECUENCIAS TÉRMICAMENTE ACOPLADAS

Se ha utilizado la técnica presentada por Hernández y Jiménez (1996; 1999a) para la obtención de los esquemas térmicamente acoplados con menor consumo de energía. Una vez que se dan las especificaciones de diseño, el método comienza con la obtención de un esquema preliminar de las secuencias térmicamente acopladas a partir de los diseños de las columnas que forman una secuencia convencional. En seguida, se llevan a cabo simulaciones rigurosas en estado estable (utilizando en este caso el simulador de procesos Aspen Plus 10.1™) para examinar los diseños preliminares. Para este tipo de secuencias es necesario llevar a cabo la optimización del esquema, es decir, encontrar los flujos de interconexión que hacen que la carga térmica sea mínima: el flujo de vapor de interconexión (FV) para la STAD (Figura 1a), el flujo de líquido de interconexión (FL) para la STAI (Figura 1b) o ambas corrientes para la columna Petlyuk (Figura 1c). Como caso de estudio, se analizó una mezcla ternaria de n-pentano (A), n-hexano (B) y n-heptano (C), con un flujo de alimentación de 45.5 Kmol/hr, y fracciones molares para A, B y C iguales a 0.40, 0.20 y 0.40. Las pro-

iedades termodinámicas fueron calculadas utilizando la correlación de Chao y Seader (Henley y Seader, 1981). Las recuperaciones de los productos fueron de 98.7, 98 y 98.6 por ciento mol de A, B y C respectivamente.

## SIMULACIÓN DINÁMICA DE LAS SECUENCIAS ACOPLADAS

Una vez obtenidos los diseños óptimos de las secuencias acopladas, se llevó a cabo un análisis dinámico utilizando Aspen Dynamics 10.1™. Las composiciones de los productos se toman como las variables de control y como variables manipulables se usaron para la STAD y STAI los reflujos y las cargas térmicas suministradas a los ebullidores, y para la columna Petlyuk la carga térmica del ebullidor, el reflujo 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 ISE (integral del error al cuadrado) (Stephanopoulos, 1984) para determinar los valores de las ganancias de los controladores ( $K_c$ ) y las constantes de tiempo integral ( $\tau_i$ ).

## RESULTADOS PARA CAMBIOS EN LOS SET POINTS

Los resultados presentados corresponden a las respuestas dinámicas de cada una de las secuencias cuando se tienen cambios en los set points y se tienen los tres lazos de control cerrados en forma simultánea. 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.

### *Secuencia Directa*

Los resultados obtenidos (Tabla 1 y Figura 2a) muestran como el componente A puede alcanzar el cambio de set point, mientras que los otros dos componentes no logran estabilizarse. Cuando se analiza esta secuencia imponiendo cambios negativos de set points (de 0.987 a 0.983 para A; de 0.98 a 0.976 en B y de 0.986 a 0.982 en C) se observan resultados similares: la secuencia no proporciona una estabilización de los componentes B y C. Esto se ve reflejado en los valores de ISE (integral del error al cuadrado) obtenidos.

### *Secuencia Indirecta*

En este caso se logra estabilizar los tres componentes en un tiempo relativamente corto. El tiempo es inferior a una hora (Figura 2b), lo cual proporciona mejores valores de ISE que en el caso anterior (Tabla 1). Las respuestas dinámicas no presentan grandes cambios a excepción del componente B, que presenta ligeras oscilaciones antes de estabilizarse. Esta secuencia presenta un comportamiento similar cuando se le aplican cambios negativos de set points.



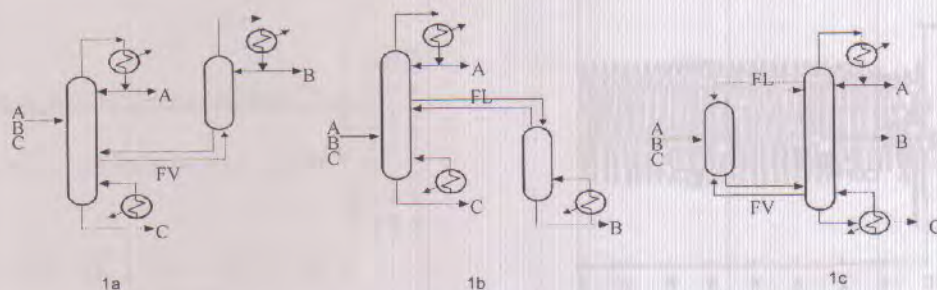


Fig 1: Secuencias térmicamente acopladas; a) STAD; b) STAI; c) columna Petlyuk.

Tabla 1: Resumen de resultados de los valores de ISE para el análisis dinámico con tres lazos de control.

Secuencia	Componente A	Componente B	Componente C
Directa	$2.34593 \times 10^{-5}$	$6.46533 \times 10^{-4}$	$1.89153 \times 10^{-4}$
Indirecta	$6.61763 \times 10^{-6}$	$5.88321 \times 10^{-4}$	$1.80253 \times 10^{-4}$
STAD	$9.58298 \times 10^{-7}$	$5.40573 \times 10^{-6}$	$4.22185 \times 10^{-6}$
STAI	$1.75948 \times 10^{-6}$	$5.51903 \times 10^{-5}$	$2.50324 \times 10^{-6}$
Petlyuk	$1.62744 \times 10^{-6}$	$2.22039 \times 10^{-6}$	$5.28006 \times 10^{-6}$

#### STAD

Los valores de ISE obtenidos (Tabla 1) muestran que la STAD presenta una mejor dinámica al compararse con las secuencias convencionales. En este caso la secuencia logra estabilizar las tres composiciones ante los tres cambios de set points impuestos (Figura 2c). Las respuestas no presentan grandes cambios antes de estabilizarse. Sin embargo, el tiempo de estabilización es relativamente grande pues en el caso del componente B es superior a las 2 horas.

#### STAI

Los valores de ISE mostrados en la Tabla 1 indican una desfavorable operación de este esquema con respecto a la STAD. La respuesta dinámica (Figura 2d) muestra como el componente A presenta una fuerte desviación antes de lograr estabilizarse. Los otros dos componentes, B y C, ofrecen una mejor respuesta dinámica que el componente más ligero.

#### Columna Petlyuk

De los valores de ISE obtenidos (Tabla 1), se puede establecer que la columna Petlyuk presenta una buena dinámica en comparación al resto de las columnas analizadas. La respuesta dinámica (Figura 2e) muestra que hay ligeras alteraciones de las composiciones antes de lograr el nuevo estado estable, con un tiempo de estabilización mayor de una hora. El componente intermedio B

es el que presenta más dificultad para estabilizarse ante el cambio impuesto en el set point.

#### RESULTADOS PARA PERTURBACIONES EN LA ALIMENTACIÓN

Se llevó a cabo un análisis adicional al considerar el efecto de la presencia de perturbaciones en la composición de la alimentación. Se consideró primero un aumento en el flujo del componente más volátil de 2.275 Kmol/hr con respecto a su valor original en la mezcla de alimentación; el flujo de los otros dos componentes se ajustó de manera proporcional para conservar el flujo total de alimentación original de 45.5 Kmol/hr. Se analizaron otros dos casos aumentando de manera similar el flujo de B (con una disminución en los flujos de A y C) y finalmente el del componente C (con ajustes en los flujos de A y B). Las tendencias de los resultados obtenidos en cada caso fueron similares por lo que se muestran solamente los obtenidos al aumentar el flujo del componente C. Para el caso de la secuencia directa (Figura 3a) se puede observar que no presenta una buena dinámica, puesto que ante la perturbación en la alimentación no logra estabilizar la composición de salida para ninguno de los tres componentes. La secuencia indirecta (Figura 3b) no pudo manejar el cambio impuesto, pues si se sometía a esta perturbación, la simulación no lograba su convergencia; sólo se obtuvo convergencia si los cambios impuestos a los componentes de la alimentación eran de 1.1375 Kmol/hr o menores. Aunque para estos casos las respuestas obtenidas presentan una



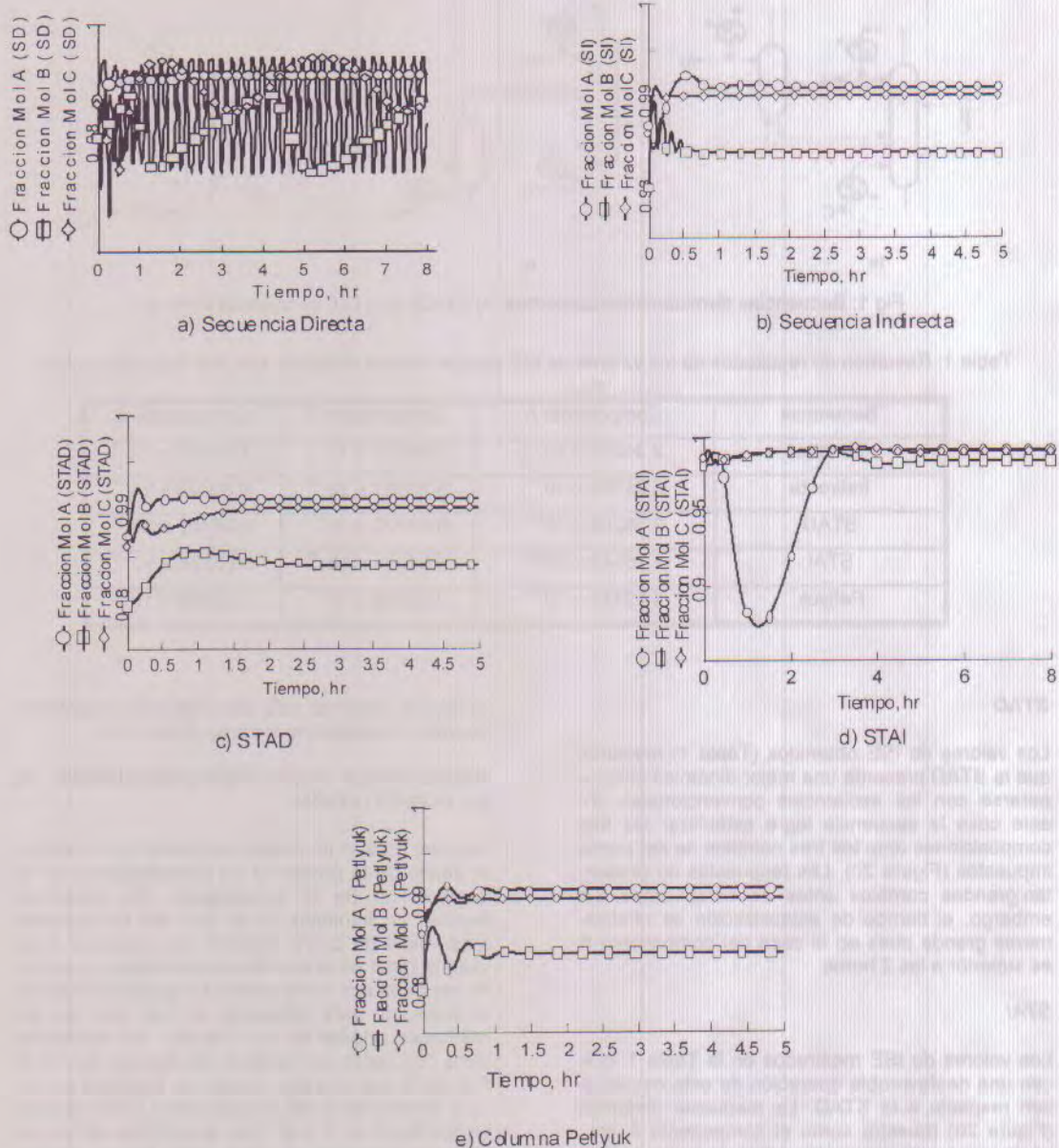
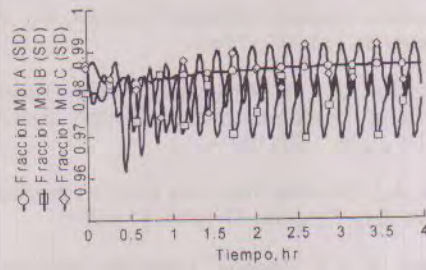


Fig 2: Respuestas dinámicas de las composiciones de los productos en todas las secuencias para cambios positivos en los set points con los tres lazos de control cerrados

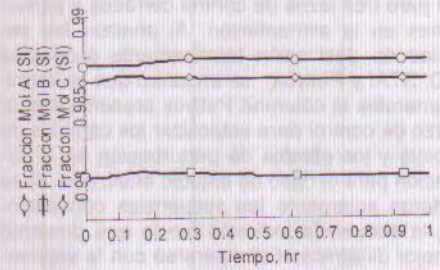
excelente dinámica, el nivel de perturbación bajo el cual se obtienen estos resultados implica que el sistema ofrece poca robustez. La respuesta dinámica de la STAD (Figura 3c) muestra un comportamiento apropiado, lo cual se corrobora con los valores de ISE ( $A = 1.08377 \times 10^{-6}$ ,  $B = 2.68996 \times 10^{-5}$ ,  $C = 1.61650 \times 10^{-6}$ ). Al analizar las respuestas resalta que el control de los componentes extremos es bueno, y que el componente inter-

medio ofrece la parte más sensible para su control. En el análisis de la STAI, la respuesta dinámica (Figura 3d) muestra que esta secuencia también logra estabilizar las tres composiciones ante la perturbación impuesta en la composición de la alimentación. Los valores de ISE obtenidos para este caso son:  $A = 2.61209 \times 10^{-8}$ ,  $B = 2.75319 \times 10^{-5}$ ,  $C = 5.35672 \times 10^{-7}$ . También se observa que las composiciones de los componentes B y C en

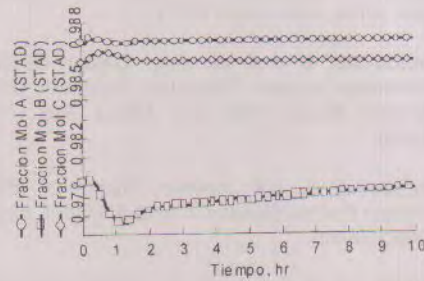




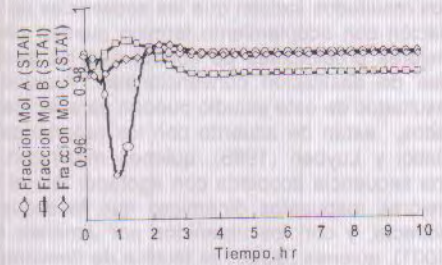
a) Secuencia Directa



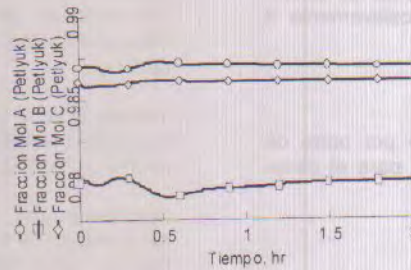
b) Secuencia Indirecta



c) STAD



d) STAI



e) Columna Petlyuk

Fig 3: Respuestas dinámicas de las composiciones de los productos en todas las secuencias para perturbaciones en el componente C de la alimentación.

las corrientes de salida presentan oscilaciones antes de estabilizarse. La columna Petlyuk presenta los mejores resultados al compararse con el resto de las secuencias (Figura 3e), lo cual se verifica con los valores de ISE asociados con las respuestas para el control de cada componente ( $A = 4.74512 \times 10^{-6}$ ,  $B = 3.12250 \times 10^{-7}$ ,  $C = 2.63693 \times 10^{-5}$ ). Al observar las respuestas se puede notar que las composiciones de salida presentan pocas alteraciones antes de estabilizarse, y que su

tiempo de estabilización es menor que el resto de las secuencias analizadas.

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Las propiedades de control de varias secuencias de destilación para mezclas ternarias, que incluyen secuencias convencionales y esquemas integrados, se obtuvieron mediante el estudio de las respuestas dinámicas ante cambios en los set



points para tres lazos de control cerrados y perturbaciones en la alimentación. Al analizar las secuencias de destilación térmicamente acopladas (STAD, STAI y Petlyuk), se encontró que en términos generales la columna Petlyuk presenta menor esfuerzo de control para estabilizar los cambios de set points y los efectos de perturbación en la alimentación para el caso de estudio analizado. Si se consideran solamente las secuencias convencionales, la secuencia indirecta fue la que presentó una mejor dinámica al compararse con la secuencia directa. Es interesante resaltar que la secuencia directa, de amplio uso industrial, fue la que presentó las peores propiedades de control.

## CONCLUSIONES

Los resultados indican que las secuencias de destilación con acoplamiento térmico pueden ofrecer mejores propiedades de control que las secuencias de destilación convencionales. Aunque los resultados de este estudio pueden parecer inesperados, están de acuerdo con los reportados por Alatiqi y Luyben (1986), quienes mostraron que una secuencia acoplada con agotador lateral tuvo mejores respuestas dinámicas que la secuencia indirecta, y con los obtenidos por Jiménez *et al* (2001), quienes usando la técnica de descomposición en valores singulares encontraron que las propiedades teóricas de control de las secuencias térmicamente acopladas son mejores que las de las secuencias convencionales. Parece ser que la presencia de corrientes de reciclo en lugar de deteriorar el comportamiento dinámico de las columnas de destilación, contribuyen positivamente a sus propiedades dinámicas.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico por parte de CONCyTEG y CONACYT, México, para el desarrollo de este proyecto.

## REFERENCIAS

- Abdul-Mutalib, M. I. y R. Smith, Operation and Control of Dividing Wall Distillation Columns. Part I: Degrees of Freedom and Dynamic Simulation. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 76, 308 (1998).
- Alatiqi, I. M. y W.L. Luyben, Alternative Distillation Configurations for Separating Ternary Mixtures with Small Concentration of Intermediate in the feed. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 24, 500 (1985).
- Alatiqi, I. M. y W. L. Luyben, Control of a Complex Sidestream Column/Stripper Distillation Configuration. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 25 762 (1986).

Dunnebie, G. y C. Pantelides, Optimal Design of Thermally Coupled Distillation Columns. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38, 162 (1999).

Fidkowski, Z. y L. Krolikowski, Energy Requirements of Nonconventional Distillation Systems. *AIChE J.*, 36, 1275(1991).

Finn, A.J., Consider Thermally Coupled Distillation. *Chem. Eng. Progress*, October, 41 (1993).

Glinos, K. y F. Malone, Optimality Regions for Complex Columns Alternatives in Distillation Systems. *Chem. Eng. Res. Des.*, 66 (1988) 229.

Henley, E. J. y J. D. Seader, Equilibrium Stage Separation Operations in Chemical Engineering, John Wiley, New York (1981).

Hernández, S. y A. Jiménez, Design of Optimal Thermally-Coupled Distillation Systems Using a Dynamic Model. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 74, 229 (1996).

Hernández, S. y A. Jiménez, Design of Energy-Efficient Petlyuk System. *Comput. Chem. Eng.*, 23, 1005 (1999a).

Hernández, S. y A. Jiménez, Controllability Analysis of Thermally Coupled Distillation Systems. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 38, 3957 (1999b).

Jiménez, A.; Hernández, S.; Montoy, F.A. y M. Zavala-García, Analysis of Control Properties of Conventional and Nonconventional Distillation Sequences. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40, 3757 (2001).

Tedder, D.W. y D.F. Rudd, Parametric Studies in Industrial Distillation: Part I. Design Comparisons. *AIChE J.*, 24, 303 (1978).

Stephanopoulos, G., Chemical Process Control. An Introduction to Theory and Practice. Prentice Hall Inc., USA (1984).

Wolff, E.A. y S. Skogestad, Operation of Integrated Three-Product (Petlyuk) Distillation Columns. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 2094 (1995).

Yeomans, H. e I. Grossmann, Optimal Design of Complex Distillation Columns Using Rigorous Tray - by - Tray Disjunctive Programming Models. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39, 4326 (2000).