

NUEVAS PERSPECTIVAS EN PROCESOS DE SEPARACIÓN: SIMULACIÓN COLUMNA DE DESTILACIÓN CON INTEGRACIÓN INTERNA DE CALOR (CDIIC)

J. LEON PULIDO^{1*}; M. R. WOLF MACIEL¹; R. MACIEL FILHO²

¹Laboratório de Desenvolvimento de Processos de Separação – LDPS (UNICAMP)

²Laboratório de Otimização, Projeto e Controle Avançado - LOPCA (UNICAMP)

Caixa Postal 6066, 13083 – 970, Campinas - SP. Brazil

*jeffleon@feq.unicamp.br

Fecha Recepción: 18 de Septiembre de 2009

Fecha Aceptación: 1 de Noviembre de 2009

RESUMEN

Las columnas con integración interna de calor CDIIC se caracterizan por la diferencia de presión entre las secciones de rectificación y agotamiento ubicadas en forma concéntrica. Básicamente, la nueva configuración consta de una sección de rectificación que trabaja a mayor presión y temperatura, la cual transfiere calor a la sección de agotamiento disminuyendo el consumo energético con respecto a la destilación convencional. El presente trabajo estudia el concepto de columna con integración interna de calor para una mezcla binaria benceno-tolueno; el estudio muestra que existe un gran potencial de ahorro energético con respecto a la convencional. La columna CDIIC muestra una amplia perspectiva de trabajo como alternativa para separaciones industriales.

Palabras clave: *destilación, integración de calor, integración de procesos.*

ABSTRACT

The Heat Integrated Distillation Column HIDiC is characterized by the pressure difference between the rectification and stripping sections in a concentric system. Basically, the new configuration consists of a rectifying section that works at higher pressure and temperature, which transfers heat to the stripping section for decreasing energy consumption compared to the conventional distillation. The present study examines the concept of heat integrated column within a binary mixture benzene-toluene and presents great potential for energy savings. HIDiC column shows a broad perspective of work as an alternative for industrial separations.

Keywords: *distillation, heat integration, process integration.*

INTRODUCCIÓN

Los procesos de separación han sido usados por diferentes industrias químicas y petroquímicas desde la antigüedad. El alto consumo de energía requerida por los procesos de destilación y la necesidad de disminuir costos energéticos, fundamenta el interés de grupos de investigación y universidades extranjeras en el estudio de nuevas tecnologías que permitan un ahorro

energético que contribuya a la disminución del impacto ambiental generado en procesos industriales. Se han presentado estudios sobre la implementación de tecnologías eficientes como el acoplamiento térmico, integración de calor, recompresión de vapor y bombas de calor para incrementar la eficiencia en destilación [1-3]. El concepto de CDIIC no está claramente atribuido a algún grupo o universidad, es posible que el primer concepto claro de columna de destilación

con integración interna de calor fue presentado en el año 1997, debido a la preocupación mundial por el ahorro energético. El foco más importante fue desarrollado por universidades y grupos de investigación japoneses; posteriormente la Universidad de Delft en Holanda adelantó estudios importantes en este tipo de configuración y en la actualidad por laboratorios de investigación en Brasil. Actualmente solo existen dos columnas construidas y publicadas en el mundo; su construcción fue concluida por Kimura Chemical Plants Co., Ltd. en el año 2005 [4] y la Universidad TU Delft en Holanda [5].

El concepto de columna con integración interna de calor conocido en la literatura como "*Heat Integrated Distillation Column – HIDiC*" trabaja el mismo principio de la destilación convencional, aprovechando el calor de la sección de rectificación para transferirlo a la sección de agotamiento. Conceptos como el de columnas de destilación batch [6] y destilación con cambios de presión "pressure swing distillation" [6] son aplicados a esta nueva tecnología. El arreglo interno de la columna CDIIC, configura concéntricamente la sección de rectificación con respecto a la sección de agotamiento. La sección de rectificación trabaja a mayor presión y temperatura que la sección de agotamiento. Para garantizar esto, son ubicados entre las secciones, un compresor encargado de elevar la presión del vapor proveniente de la sección de agotamiento hacia la sección de rectificación y una válvula de estrangulamiento que permite el paso de un reflujo proveniente de la sección de rectificación hacia la sección de agotamiento. Este arreglo interno entre las dos secciones disminuye el consumo energético con respecto a la configuración convencional; esto se debe a que el condensador y el rehervidor requieren menor cantidad de energía para la separación. En procesos de separación la columna CDIIC muestra un gran potencial de ahorro energético con respecto a la destilación convencional.

PERSPECTIVA EN COLUMNA CDIIC

El potencial de ahorro energético que ofrece CDIIC en separaciones complejas y el gran uso industrial de columnas de destilación hacen de este estudio un proyecto de gran importancia para la posible transformación de la industria, solucionando en gran parte problemas energéticos y disminuyendo

emisiones de CO₂ al ambiente asociados a calderas y equipos generadores de calor.

Los estudios realizados para la columna CDIIC predominan a nivel experimental hasta ahora y han sido financiados por universidades del exterior y por importantes agencias de fomento, como la Universidad TU Delft (Holanda), el Ministerio de Economía Holandés (EETK001025), Akzo Nobel, BP, DSM, ECN, Shell Global Solutions y Sulzer Chemtech [4] También en Japón, a través de National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Kimura Chemical Plants Co. Ltd, Kansai Chemical Engineering Co. Ltd, y Tokyo Institute of Technology [5] y actualmente por el Laboratorio de Desenvolvimento de Processos de Separação (LDPS) Unicamp en Brasil.

El concepto de CDIIC es basado en la propuesta estudiada por Mah et al. [7] como un método para el ahorro energético en columnas de destilación. A partir de estos trabajos el concepto de integración interna de calor fue tomando fuerza. Estudios realizados muestran que CDIIC disminuye hasta el 50% del consumo energético con respecto a la columna convencional [8].

ESTUDIOS DESARROLLADOS

Debido a la necesidad de disminuir costos en las operaciones industriales, el concepto de ahorro energético comenzó a tomar gran importancia en los investigadores, posteriormente Seader [9] sugirió diferentes propuestas a lo presentado por Mah. Por otra parte, una configuración de tubo y carcasa empaquetada fue presentada por Aso et al. [10] para la integración de calor. En la actualidad los estudios más recientes han sido realizados por investigadores japoneses y holandeses [11-17] que han estudiado la columna con integración interna de calor, mostrando resultados de un 50% de ahorro energético con respecto a la convencional.

Las investigaciones realizadas, en aspectos de modelaje matemático y diseño no han sido presentadas en su totalidad. Los estudios de simulaciones y datos de operación de planta piloto existentes han sido publicados de manera restringida. Este trabajo centra su atención en la transferencia de calor entre secciones en una columna de destilación con integración interna de calor CDIIC.

PRINCIPIOS DE LA COLUMNA CDIIC

La columna de CDIIC posee el mismo principio de la columna convencional. La nueva configuración es una de las perspectivas más prometedoras debido al potencial de ahorro energético.

La columna CDIIC representada en la Figura 1, consta de dos columnas anulares, una trabaja como sección de rectificación y la otra como sección de agotamiento. Las columnas están ubicadas concéntricamente, de esta manera el intercambio de calor va de la columna de rectificación a la de agotamiento, disminuyendo la carga energética en el rehervidor y el condensador, aumentando la eficiencia energética.

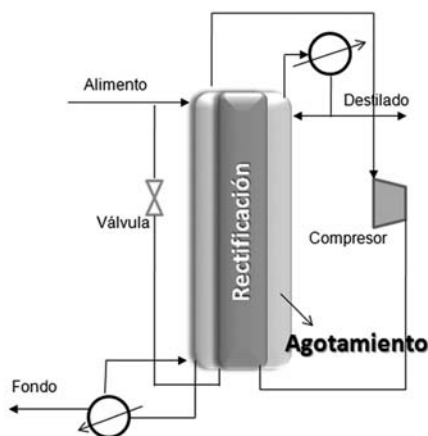


Figura 1. Columna de Destilación con Integración de Calor

El calor de la sección de rectificación es reutilizado para ser transferido a la sección de agotamiento. La baja eficiencia energética de la columna convencional fue el principal interés de la investigación, generando nuevos conceptos para mejorar las tecnologías de destilación. El principio de la integración interna de calor, parte de las investigaciones realizadas para el aprovechamiento de calor [18-25].

Para el manejo de las presiones es usado un compresor y una válvula entre las dos secciones. El vapor comprimido es alimentado a la sección de rectificación mientras el fondo líquido de la misma sección se alimenta de nuevo a la sección de agotamiento. El destilado que se obtiene de la sección de rectificación es el producto, mientras que la corriente en la parte inferior de la sección de agotamiento es el fondo.

POTENCIAL DE AHORRO ENERGÉTICO

Los estudios realizados para la columna CDIIC y simulaciones desarrolladas por importantes grupos de investigación japoneses [26,27], e informes presentados de la planta piloto [28], demuestran la viabilidad de la columna CDIIC, encontrando atractivo la separación de mezclas con puntos de ebullición cercanos, además de operar a una menor relación de compresión en la bomba de calor, como lo presenta la teoría. De esta manera CDIIC es viable para separaciones con volatilidad relativa baja y especificaciones ajustadas del producto.

SIMULACIÓN CDIIC CASO DE ESTUDIO

Se estudió la mezcla binaria Benceno-Tolueno haciendo uso del simulador de procesos Aspen Plus®. El modelo NRTL fue usado para obtener los datos de equilibrio líquido-vapor. Las condiciones de alimento se detallan en la Tabla 1. La columna CDIIC fue simulada a partir de una interconexión térmica de las secciones, ajustando la configuración de acuerdo a las herramientas del simulador de procesos. Para el desarrollo de la simulación las condiciones fueron establecidas para equilibrio entre platos, estado estacionario y sin caída de presión en las columnas. El calor es transferido de la sección de rectificación a la de agotamiento plato a plato. La transferencia de calor es constante a lo largo de la columna.

$$Q = UA\Delta T \quad (1)$$

Siendo UA y la diferencia de temperaturas constantes a lo largo de la columna; conociendo el comportamiento de la columna referente a la transferencia de calor y el valor del calor Q se obtiene de acuerdo a la diferencia de entalpías en la sección. La compresión es asumida isentrópica y la válvula opera adiabáticamente para mantener la presión necesaria entre las secciones, siendo de 0,1013 MPa en la columna convencional y en la sección de agotamiento de la CDIIC. El método usado para el cálculo de los parámetros de la mezcla es NRTL. Cabe destacar que la transferencia de calor es directa entre las torres, por lo cual se despreció la resistencia del material.

Tabla 1. Datos de la simulación

ESPECIFICACIONES		
Ítem	Columna Convencional	CDIIC
Número de platos	22	22
Presión Rectificación (MPa)	0,1013	0,25
Presión Agotamiento (MPa)	0,1013	0,1013
Razón Flujo en el Alimento (kmol/h)	100	100
Composición Benceno en Alimento (Frac mol)	0,5	0,5

Los resultados se presentan en la Tabla 2. Para la simulación de la columna convencional se consideraron las mismas condiciones de operación. Los resultados obtenidos muestran un consumo energético menor del rehervidor y el condensador con respecto a la columna convencional. Para la columna convencional la condición mínima de reflujo teórico, necesita infinitas secciones, lo cual corresponde al mínimo de energía requerido para esta columna.

Tabla 2. Resultados Simulación

Item	Convencional	CDIIC
Q Rehervidor (kW)	18898,17	252,08
Q Condensador (kW)	-18897,03	-241,26
Frac. Benceno Destilado	0,999	0,89
Eficiencia Compresor	-	0,8

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Es notorio que la integración interna presenta mejoras en el consumo de energía en procesos de destilación. Las columnas CDIIC exponen gran potencial para el ahorro energético en columnas de destilación como se muestra en la Tabla 2. La concentración en el destilado es muy parecida para las dos simulaciones, mientras el consumo

energético es menor en la columna CDIIC. De esta manera la separación para mezclas con puntos de ebullición muy cercanos se puede realizar en columnas CDIIC.

La mezcla de estudio fue alimentada en fracciones iguales y se estimó un número de platos incluidos el condensador y el rehervidor, permitiendo obtener los componentes concentrados en las corrientes de producto. La columna fue ajustada rigurosamente para simular las condiciones de operación dividiéndose en dos columnas, una operando como sección de agotamiento y la otra como sección de rectificación. La primera sección opera sin condensador, entregando como producto de cima vapor rico en benceno para ser transportado al compresor; esta sección esta conectada a las corrientes de alimento y reciclo. La segunda sección opera sin rehervidor, el producto condensando es el producto final de cima y la corriente de fondo de esta sección es la corriente de reciclo. El calor contenido en esta sección es transferido plato a plato a la sección de agotamiento a lo largo de la columna.

Para el desarrollo de la simulación condiciones de presión a 1 atm, fueron ajustadas para la operación, teniendo en cuenta que no hay perdida de carga en la columna y enfocando la simulación al estudio del consumo de energía y la transferencia de calor entre secciones, el simulador comercial Aspen Plus permite la adecuación y ajuste de las condiciones de operación necesarias para obtener resultados que permiten estudiar el comportamiento y viabilidad de esta columna como una alternativa para la disminución del consumo de energía en procesos de destilación.

Las relaciones de reflujo de la columna CDIIC con respecto a la convencional varían significativamente debido a la configuración de presiones y temperatura, por lo tanto la pureza de los productos de tope y de fondo están rigurosamente ligados a la geometría de la columna, además de la configuración del compresor y la válvula para mantener la presión y temperaturas necesarias en la sección de agotamiento y de rectificación. La configuración concéntrica presenta un ahorro energético considerable en el rehervidor y el condensador, comparada con la columna convencional.

CONCLUSIONES

La columna CDIIC especialmente construida para aprovechar el calor de la sección de rectificación y transferir este a la sección de agotamiento, permite disminuir el consumo energético con respecto a la columna convencional, disminuyendo de igual forma los costos de operación. Este trabajo estudió la mezcla binaria benceno–tolueno con el fin de conocer las ventajas que presenta esta configuración con respecto a la convencional. La simulación estudiada fue encaminada a evaluar el consumo energético con respecto a la columna convencional. CDIIC es una columna que potencializa el ahorro energético, por medio de diferencia de presión y temperaturas, asistida por equipos para el desarrollo de la operación. La Tabla 2 muestra el consumo de energía en el rehervidor y el condensador de la columna CDIIC el cual es menor con respecto a la columna convencional. La diferencia de presión entre las secciones trabaja como bomba de calor, permitiendo reducir la carga energética en el rehervidor y el condensador. La disminución de su consumo energético, disminuyen a su vez las emisiones de CO₂ al medio ambiente, con respecto a los equipos generadores de calor, estos estimativos serán considerados en estudios posteriores. En el presente trabajo, la columna CDIIC presenta un gran porcentaje de ahorro con respecto a la columna convencional. El calor en el rehervidor disminuye en un 40% y el calor retirado del condensador disminuye 45% respectivamente, de esta manera la columna CDIIC muestra una amplia perspectiva de trabajo como alternativa para separaciones industriales. En trabajos posteriores, es importante el estudio sobre la pérdida de carga, configuración óptima, geometría de secciones e identificación de efectos relacionados a la columna CDIIC.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el apoyo financiero de FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) y el apoyo de LDPS (Laboratório de Desenvolvimento de Processos de Separação), LOPCA (Laboratório de Otimização, Planejamento e Controle Avançado) para el desarrollo del presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W.J. Stupin and F.J. Lockhar, Chem. Eng. Progress 68(10), 1972, pgs. 71-72.
- [2] B. Linnhoff, H. Dunford and R. Smith, Chem. Eng. Sci., 38(8), 1983, pgs. 1175-1188.
- [3] D.C. Freshwater, IChemE, 29, 1951, pgs. 149-160.
- [4] I. Koichi, N. Masaru, H. Kejin, M. Keigo, N. Toshinari, O. Takao, E. Akira and Y. Takuji. An Internally Heat-Integrated Distillation Column (HIDIc) in Japan. IChemE, 152, 2006, pgs. 900-911.
- [5] A. de Reijke, W. Tesselaar, M. A. Gadalla, Z. Olujic and P.J. Jansens. Heat and Mass Transfer Characteristics of an Annular Sieve Tray. IChemE, 152, 2006, pgs. 181-189.
- [6] Amiya K. Jana. Heat-Integrated Distillation operation. Applied Energy 87, 2010, pgs. 1477–1494.
- [7] Mah, R., Nicholas, J.J. and Wodnik, R.B, Distillation with Secondary Reflux and Vaporization, a comparative evaluation, AIChE J, 23, 1977, pgs. 651-658.
- [8] Z. Olujic, L. Sun, A. de Rijke, P. J. Jansens. Conceptual design of an internally heat integrated propylene-propane splitter. Energy 31, 2006, pgs. 3083-3096.
- [9] J.D. Seader, US Patent No. 4,234,391 1978/1980.
- [10] Aso, K., Matsuo, H. Noda, T. Takada and N. Kobayashi, US Patent No. 5,783,047 1996/1998.
- [11] M. Nakaiwa, K. Huang, M. Owa, T. Akiya, T. Nakane, M. Sato and T. Takamatsu, Energy, 22, 1997, pgs. 621-625.
- [12] M. Nakaiwa, K. Huang, K. Naito, A. Endo, M. Owa, T. Akiya, T. Nakane, T. Takamatsu. A new configuration of ideal heat Integrated

- Distillation columns. *Computers and Chemical Engineering*. 24, 2000, pgs. 239-245.
- [13]M. Nakaiwa, K. Huang, K. Naito, A. Endo, T. Akyu, T. Nakane and T. Takamatsu, *Computers and Chemical Engineering*., 25, 2001, pgs.737-744.
- [14]K. Naito, M. Nakaiwa, K. Huang, A. Endo, T. Aso, T. Nakanishi, T. Nakamura, H. Noda, T Takamatsu.. Operation of bench scale ideal heat integrated distillation column (HIDiC): an experimental study. *Computers and Chemical Engineering*, 24, 2000, pgs. 495-499.
- [15]T. C. Huang, J. Lin, L. Lee. Dynamic simulation for internally heat-integrated distillation columns (HIDiC) for propylene-propane system. *Computers and Chemical Engineering* 2009.
- [16]Huang, K., Shan, L., Zhu, Q., Qian, J. A totally heat Integrated distillation column (THIDiC) – the effect of feed pre – heating by distillate.. *Applied Thermal Engineering*. 28, 2008, pgs. 856-864.
- [17]Gadalla, M., Jimenez, L., Olujic, Z., Jansens, P.J. A thermo-hydraulic approach to conceptual design of an internally heat-integrated Distillation column. *Computers and Chemical Engineering*, 31, 2007, pgs. 1346-1354.
- [18]Freshwater, D.C., *Thermal Economy in Distillation*, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 29, 1951, pgs. 149-160.
- [19]M. Gadalla, Z. Oujic, L. Sun, A. De Rijke and P. J. Jansens. Pinch Analysis Based Approach to Conceptual Design of Internally Heat-Integrated distillation columns. *Inst. of Chem. Eng. Trans IChemE, Part A, August 2005 Chemical Engineering and Design*, 83(A8): 2005, pgs. 987-993.
- [20]H. Noda, T.Takamatsu, K. Aso, T. Nakanishi, K. Yoshida, M. Nakaiwa, T. Mukaida and N. Kuratani. Developmen on Coaxial Heat-Integrated Distillation column (HIDiC). *Korean J. Chem. Eng.* 17(5), 2000, pgs. 593-596.
- [21]J. de Graauw, US Patent No. 0121303A1 2005.
- [22]E. Rév, M. Emtir, Z. Szitkai, P. Mizsey, Z. Fonyó. Energy savings of integrated and coupled distillation systems. *Computers and Chemical Engineering*, 25, 2001, pgs. 119-140.
- [23]K. Huang, L. Shan, Q. Zhu, J. Qian. Design and control of an ideal heat integrated distillation column (ideal HIDiC) system separating a close-boiling ternary mixture. *Energy*. 32, 2007, pgs. 2148-2156.
- [24]J. A. Hugill, US Patent No: 7,111,673 B2 2006.
- [25]M. Gadalla, Z. Olujic, A. de Rijke, P. J. Jansens. Reducing CO2 Emissions of Internally Heat-Integrated Distillation columns for separation of close boiling mixtures. *Energy*, 32, 2006, pgs. 2409-2417.
- [26]Liu, X.G. and Qian J.X., *Chem. Eng. Technol.*, 23: 2000, pgs. 235-241.
- [27]Keller G.E. and Humphrey, J.L., *Separation Process Technology*, McGrawHill, New York 1995.
- [28]Jansens, P. J. Fahkri, F., de Graauw. J. And Olujic, Z., Energy saving potential heat integrated distillation column, *Proceedings of the topical distillation symposium, AIChE 2001 Spring Meeting Houston*, 22-26 April, 2001, pgs. 19-25.