

Coluna de destilação concêntrica com integração interna de calor (CDIIC): estudo energetico em diferentes arranjos geometricos

*Columna de destilación concentrica con
aprovechamiento de calor (CDIIC): estudio
del consumo energético en diferentes
arreglos geométricos*

*Internally heat-integrated distillation
column (hidic): study of the energy
consumption in different geometric
arrangements*

*Colonne de distillation concentrique avec
réutilisation de chaleur (cdiic): étude de la
consommation énergétique de différents
réglages géométriques*

Jeffrey León-Pulido*

Ángel Darío González-Delgado**

Julio P Maia***

Fecha de recepción: 9 de febrero

Fecha de aprobación: 8 de marzo

Pp. 143-162

* EAN University, Faculty of Engineering

** Cartagena University, School of Chemical Engineering

*** University of Campinas, School of Chemical Engineering jleomp@ean.edu.co

RESUMO

A coluna de destilação com integração interna de calor (CDIIC) apresenta um grande potencial na diminuição do consumo de energia em processos de destilação. Basicamente, é uma configuração concêntrica de coluna de destilação, onde a seção de retificação opera a maior pressão e temperatura, fazendo a roca e energia com a seção de esgotamento. Atualmente, a unidade industrial não é uma realidade, sendo assim uma grande quantidade de trabalhos uma necessidade para o desenvolvimento da unidade a grande escala. O presente trabalho estuda quatro diferentes configurações de coluna CDIIC (media, topo, fundo e total-a mesma quantidade de estágios nas duas seções) na mistura benzeno-tolueno fazendo uma comparação do consumo de energia em relação ao convencional. O presente estudo apresenta uma nova perspectiva na separação de processos fazendo uso do simulador Aspen One para o modelamento e obtenção das condições de operação e dados do consumo energético, as diferentes configurações apresentam a coluna CDIIC como uma perspectiva de trabalho na indústria de separação.

PALAVRAS-CHAVE

HIDiC, destilação, integração de calor, processos de separação, simulação.

RESUMEN

La columna de destilación con integración interna de calor –HIDiC– muestra un gran potencial en la reducción del consumo de energía en procesos de destilación. Básicamente, es una unidad de columna concéntrica donde la sección de rectificación trabaja a mayor presión y temperatura permitiendo transferir la energía a la unidad de agotamiento. Actualmente, esta operación unitaria no es una realidad en la industria, y requiere diferentes estudios para llevarlo a una escala industrial. Esta investigación estudia cuatro diferentes configuraciones de columna HIDiC (medio, tope, fondo y total –misma cantidad de platos a lo largo de las secciones) para la mezcla benceno-tolueno, permitiendo comparar el consumo energético comparado con la unidad convencional. Esta investigación presenta una nueva perspectiva en procesos de separación usando el simulador de procesos Aspen Plus para la obtención del modelo matemático y los cálculos energéticos; las diferentes configuraciones de columna presentan una amplia perspectiva en procesos de separación.

PALABRAS CLAVE

HIDiC, destilación, integración de calor, proceso de separación, simulación.

ABSTRACT

The internally heat-integrated distillation column -HIDiC- shows great potential in reducing energy consumption in distillation processes. Basically, it is a concentric column unit where the rectifying section works at higher pressure and temperature, allowing energy to be transferred to the stripping unit. Currently, this unitary operation is not a reality in the industry, and requires different studies to shift to an industrial scale. This research focuses on four different configurations of the HIDiC (middle, top, bottom and total – same amount of transfer panels along the sections) for the benzene-toluene mixture, allowing the comparison of energy consumption when using the conventional unit. This research presents a new perspective in separation processes using the Aspen Plus process simulator for obtaining the mathematical model and energy calculations; the different configurations for the column have wide perspective in separation processes.

KEYWORDS

Heat Integrated Distillation Column (HIDiC), distillation, heat integration, separation process, simulation.

RÉSUMÉ

La colonne de distillation avec intégration de chaleur –HIDiC- offre un fort potentiel de réduction de consommation d'énergie lors des processus de distillation. Il s'agit en réalité d'une unité de colonne concentrique dans laquelle la section de rectification évolue à une pression et température plus importantes permettant un transfert d'énergie à l'unité d'épuisement. Ce type d'opération unitaire n'est pas une réalité dans l'industrie à l'heure actuelle et requiert encore différentes études pour être opératoire à l'échelle industrielle. Cette investigation analyse quatre configurations différentes de colonne HIDiC (intermédiaire, maximum, fond et total – quantité identique de plateaux le long des sections) lors du mélange benzène - toluène qui permet de comparer la consommation énergétique par rapport à l'unité conventionnelle. Cette investigation présente une nouvelle perspective lors des processus de séparation via l'utilisation du simulateur de processus Aspen Plus permettant l'obtention de modèle mathématique et de calculs énergétiques. Les différentes configurations de colonne offrent une ample perspective des processus de séparation.

MOTS CLEFS

HIDiC, distillation, intégration de chaleur, processus de séparation, simulation.

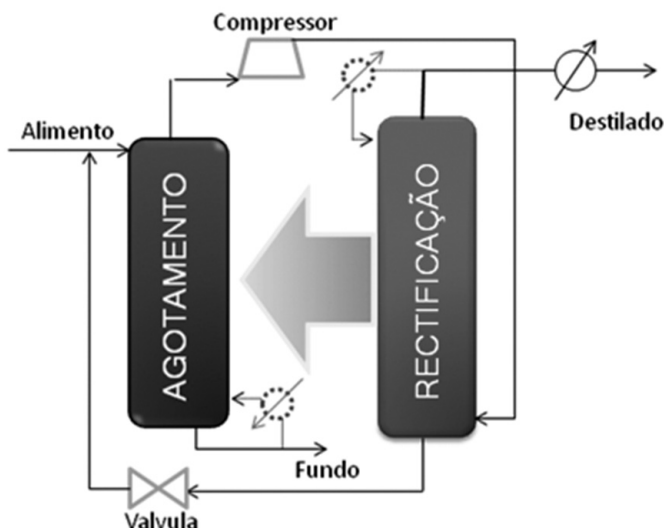
1. Introdução

Na atualidade é de maior interesse a diminuição no consumo da energia requerida nas indústrias de processos químicos, além do uso de tecnologias limpas que permitam o menor impacto ao meio ambiente. Por isto uma grande quantidade de pesquisas foi desenvolvida para chegar a novas tecnologias que diminuam o custo de operação.

A destilação é um dos processos de maior consumo energético na indústria, isto justifica os esforços para o desenvolvimento de novas tecnologias. Estudos de vaporização e refluxo secundário (SRV) desenvolvidos por Mah et al. (1977), apresentam melhorias na eficiência térmica, manipulando o refluxo e a taxa de vaporização na coluna convencional. Posteriormente Cheng e Luyben, (1985), estudaram distintos tipos de arranjos na coluna convencional para diminuir o consumo energético. A coluna com integração interna de calor “CDIIC” é apresentada na Figura 1, este conceito é conhecido na literatura como “heat integrated distillation column –HIDiC”.

O conceito de coluna CDIIC introduzido por Mah et al. permitiu o desenvolvimento do conceito de aproveitamento do calor. O trabalho de Nakaiwa et al. (1997), um dos primeiros estudos relacionados ao aproveitamento do calor da seção de retificação, incluindo uma configuração com um compressor e uma válvula para o aumento da pressão e controle do fluxo, para a diminuição da carga energética requerida pelo condensador e o refeedor.

Figura 1 – Configuração da Coluna CDIIC.



A idéia da coluna CDIIC é aproveitar o calor da seção de retificação para ser transferido à seção de esgotamento. Nakaiwa et al. (1998a) estudou cinco diferentes algoritmos de controle para a operação da coluna, com isso apresentou uma controlabilidade do processo e o tempo de estabilização. No mesmo ano, Nakaiwa et al. (1998b) apresentou um estudo do potencial energético para uma configuração ideal da coluna CDIIC comparando com a coluna convencional.

Partindo da idéia da coluna estudada por Nakaiwa et al., grupos de pesquisa japoneses publicaram numerosos trabalhos desta configuração. Naito et al. (2000), apresentaram um estudo experimental da primeira planta piloto construída por Kimura Chem. Plant. A planta serviu para o estudo do desenho interno e o comportamento da transferência de calor, os dados experimentais mostraram uma diminuição em 40% no consumo energético comparado com a convencional. No mesmo ano, Nakaiwa et al. (2000) apresentou a nova configuração de coluna CDIIC, onde desenvolveu estudos de simulação para a avaliação do processo.

Desde o ano 2000, estudos da configuração desta coluna como o controle e técnicas para a diminuição do consumo energético foram desenvolvidos. Nakaiwa et al. (2003) descreveu os esforços de pesquisa na configuração interna e as condições de processo da coluna CDIIC, neste trabalho descreve-se a organização do projeto de construção da planta piloto, o qual iniciou-se em abril do 2002. A coluna CDIIC é uma alternativa para a diminuição do consumo energético. Gadalla et al. (2005), apresentou um estudo desenvolvido na Holanda, na universidade de Delf, do análise pinch e desenho conceitual da coluna. Na atualidade, diferentes estudos referentes ao intercâmbio de calor pelo meio de trocadores na parte interna da coluna são desenvolvidos, por Holandeses, através de plantas piloto.

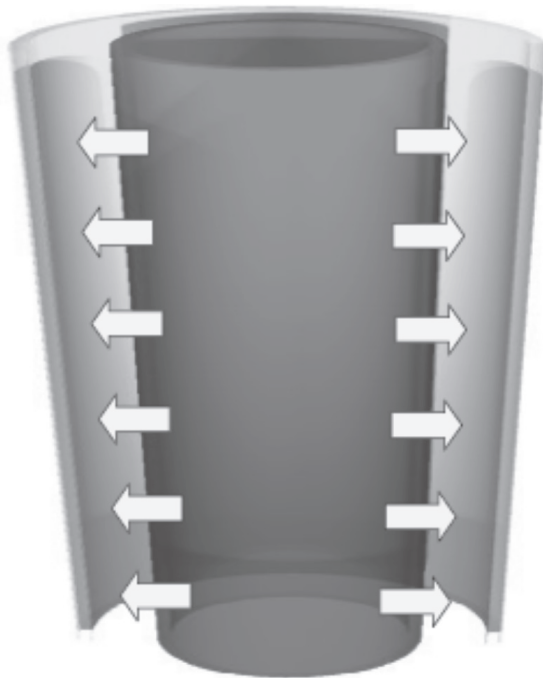
No presente trabalho se estudou quatro configurações de coluna CDIIC, com o objeto de estabelecer parâmetros que permitam conhecer o comportamento da coluna. O processo convencional foi avaliado e comparado com as diferentes configurações, os resultados apresentaram a diminuição do consumo energético da coluna CDIIC comparado com a coluna convencional. A coluna CDIIC apresenta uma grande perspectiva na diminuição do consumo de energia em processos de destilação.

2. Conceito e configuração da coluna CDIIC

O conceito da coluna CDIIC parte da configuração clássica de uma coluna convencional, composta por uma seção de esgotamento e outra de retificação, onde acontece o equilíbrio líquido-vapor. Os produtos de topo e fundo são obtidos pelo meio de um refeedor e um condensador. O novo desenho de coluna parte de uma modificação à coluna convencional, modificada a sua geometria, com o objeto de diminuir a carga no condensador e o refeedor. Olujic et al. (2006) apresentaram um estudo técnico-econômico da planta piloto construída no final de 2005 em Delf, assim, apresentou uma nova configuração baseada nas configurações apresentadas pelos grupos de pesquisa japones.

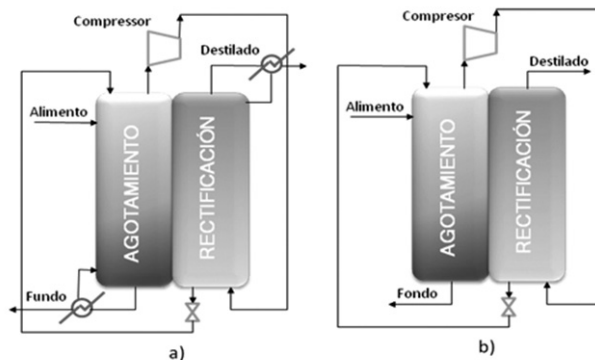
A coluna CDIIC conceitualmente, procura aproveitar o calor presente na seção de retificação para ser transferido à seção de esgotamento como se apresenta na Figura 2, por meio desta configuração pretende-se diminuir a carga energética requerida pelo refeedor e pelo condensador até zero. Para isto, as duas seções são localizadas concêntricamente (Seção de retificação dentro da seção de esgotamento), além de implementar um compressor e uma válvula de estrangulamento para garantir as condições de operação. De acordo ao arranjo entre as seções, existe uma troca de calor, que permite a diminuição da energia requerida pelo refeedor, aumentando a eficiência energética do processo.

Figura 2 – Conceito da transferência de calor Coluna CDIIC.



Dois conceitos de coluna de destilação com integração interna de calor, retirados da literatura foram, estudados neste trabalho. O primeiro, a coluna CDIIC conhecida como “HIDiC” representada na Figura 3a, que é alimentada no topo da coluna de esgotamento por uma corrente de alimentação e outra de refluxo proveniente do fundo da seção de retificação, o produto de cima da seção de esgotamento vai para um compressor aumentando a pressão e temperatura da fase vapor e posteriormente alimentado à seção de retificação, onde o calor é aproveitado para aquecer a porção de líquido na seção de esgotamento concêntricamente localizada. O fundo da seção de retificação é alimentado de novo à seção de esgotamento por meio de uma válvula.

Figura 3 – a) Coluna CDIIC, b) Coluna i-CDIIC.



O segundo conceito: a coluna ideal de destilação com integração interna de calor “i-CDIIC”, conhecida na literatura como “ideal heat integrated distillation column i-HIDiC” representada na Figura 3b, têm o mesmo princípio de operação da coluna CDIIC e o conceito de coluna concêntrica, o termo de idealidade estabelece a possibilidade de operação da coluna sem o uso do refeedor e condensador.

3. Canalse termodinamico da coluna CDIIC

Nas colunas de destilação convencionais, o calor é requerido pelo refeedor e logo é retirado no condensador, devido à diferença de temperatura, perdas de energia estão associadas ao processo. A idéia de troca interna de calor é, basicamente, um rearranjo na geometria da coluna para aproveitar o calor da seção de retificação e ser transferido à seção de esgotamento ao longo da coluna.

As vantagens termodinâmicas na introdução e remoção da energia em colunas de destilação foram baseadas nos estudos de Tondeur e Kvaalen (1987) e León et al (2011a, 2011b), onde o princípio de equipartição e geração da entropia são aplicados com critério na proposta de uma configuração ótima em processos de separação. No sentido da segunda lei, a entropia se distribui de maneira uniforme entre as variáveis do processo. O princípio de equipartição pode ser aplicado para o desenho conceitual da coluna CDIIC.

Na coluna CDIIC, é usado um compressor e uma válvula para o aumento da pressão e à temperatura da seção de retificação, isso influencia diretamente na diminuição do consumo energético. Gadalla et al. (2007) apresentou o desenho de um método para colunas com integração interna de calor, para o desenho termodinâmico, apresentou os perfis de temperatura nos estágios como a chave para a integração de calor. Sendo conhecidos os perfis de temperatura nos estágios pode-se, possivelmente, conhecer o calor transferido entre as duas colunas. Desta maneira os perfis de temperatura descrevem o mínimo calor que pode ser transferido, facilitando os trabalhos de desenho para a distribuição do calor nos estágios.

4. Estrutura do caso de estudo

Para o desenvolvimento da coluna CDIIC é de grande importância o estudo de configurações de coluna que permitam conhecer e ter mais certeza do comportamento desta configuração y da geometria usada, sendo um fator fundamental na configuração da coluna. No presente estudo, foram simuladas quatro distintas configurações de coluna. As configurações são especificadas para a transferência de calor da seção de retificação para a seção de esgotamento.

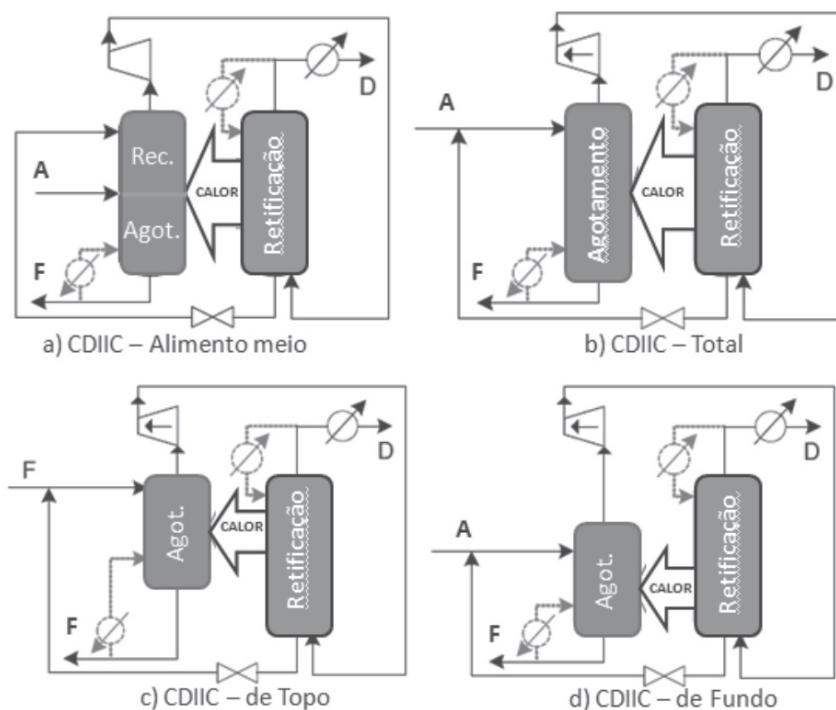
4.1 Caso base

No presente estudo, tratou-se da aproximação da configuração da coluna CDIIC, em condições de equilíbrio para quatro tipos de arranjos de coluna. A análise do comportamento da transferência de calor é planejado para troca de correntes de calor prato a prato. As diferentes configurações são desenvolvidas para condições de convergência com alimentação equimolar. O conceito de bomba de calor é incluído para manter as condições de operação pelo meio de um compressor e uma válvula. As configurações são descritas a seguir.

4.2 Configurações de coluna com integração de calor

Para o desenvolvimento de dados das colunas com integração de calor, foram estudados diferentes cenários implementados na plataforma comercial Aspen Plus, fazendo simulações aproximadas para o modelo de coluna de destilação com integração interna de calor, mantendo o conceito de desenho concêntrico e estabelecendo configurações na seção de retificação e esgotamento. As possíveis configurações apresentadas na figura 4 são comparadas com a coluna convencional.

Figura 4 – a) CDIIC de alimentação meio, b) CDIIC Total, c) CDIIC de topo, d) CDIIC fundo



As diferentes configurações são descritas seguidamente.

4.2.1 CDIIC de alimentação no meio

Esta configuração é alimentada no meio da coluna, operando como um destilador convencional. A coluna alimentada é conectada com a seção de retificação por meio de um compressor o qual aumenta a pressão e temperatura de entrada na seção de retificação. A troca de calor é dada na longitude da coluna. Olujic et al (2008) apresento estudos da melhora do intercambio termodinâmico via integração interna de calor.

4.2.2 CDIIC de topo

A configuração de topo apresenta uma configuração assimétrica, onde a seção de retificação tem menor numero de pratos conectados, de maneira similar à seção de retificação. O contato acontece só na parte de acima da seção de retificação, na parte de embaixo não apresenta transferência de calor com a outra seção.

4.2.3 CDIIC de fundo

Esta configuração apresenta o mesmo principio e configuração assimétrica da coluna CDIIC de topo, porém a interconexão de pratos é dada na fração sem intercambio da coluna de topo.

4.2.3 CDIIC total

Finalmente o arranjo total permite a interconexão para a troca de calor ao longo da coluna sendo alimentada por um refluxo proveniente da seção de retificação e por uma carga de mistura de estudo no prato superior da coluna de esgotamento. Esta configuração permite o intercambio ao longo da coluna.

5. Estudos de simulação

No presente trabalho se estudou a mistura equimolar benzeno-tolueno, fez-se o uso do simulador de processos Aspen Plus. As simulações desenvolvidas de coluna CDIIC são modelos aproximados devido a esta ferramenta não ter esta configuração dentro da base de dados. Pulido wolf. (2008), estudaram diferentes configurações de transferência de coluna CDIIC apresentando resultados na diminuição do consumo energético com respeito à convencional. Para a obtenção dos dados de equilíbrio liquido-vapor, para isto, foi utilizado o modelo NRTL. Para o desenvolvimento da simulação

foi estabelecido equilíbrio entre pratos ou estágios, operando em estado estacionário y sem perdas de pressão nas seções. O calor é transferido da seção de retificação para a seção de esgotamento prato a prato ao longo da coluna, pelo meio de correntes de calor constantes usando a equação 1.

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

Onde UA são constantes e a diferença de temperaturas ΔT entre pratos de cada seção limita o calor máximo para a transferência. O calculo das diferenças de entalpias permite a obtenção do calor Q usado na interconexão térmica entre as duas seções. Para garantir as pressões do sistema foi instalado um compressor e uma válvula. O compressor trabalha de maneira isentrópica e a válvula adiabaticamente. Para a transferência de calor é desprezada a resistência do material e a alimentação é pré-aquecida anteriormente.

A tabela 1 mostra as condições de operação para as diferentes configurações, uma coluna convencional e quatro colunas CDIIC.

Tabela 1 – Condições de operação Coluna convencional e Colunas CDIIC.

Config.	CC	CDIIC meio	CDIIC topo	CDIIC fundo	CDIIC total
Estagios ret./est.	22	11/11	11/11	11/11	11/11
Prect(MPa)	0.1	0,1	0,1	0,1	0,1
Pagot(MPa)	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
Fluxo Alim.(Kmol/h)	100	100	100	100	100
Fração Alim.	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Neste trabalho foram apresentados resultados de simulações de diferentes arranjos de coluna de destilação com

integração interna de calor em função a os arranjos propostos, facilitando o estudo pelo meio do simulador de processos Aspen Plus.

6. Analise e resultados

A simulação da coluna CDIIC apresentada neste trabalho, faz avaliação da configuração aproximada desta coluna no simulador convencional. As condições da simulação são estabelecidas para convergência incluindo o compressor e a válvula para manter as condições do sistema, isto garante que a seção de retificação se encontra a maior pressão e temperatura que a seção de agotamento.

Os resultados obtidos das simulações de coluna CDIIC são obtidos pelo meio da variação na interconexão térmica entre as duas seções, o numero de pratos foi mantido para o analise do comportamento da configuração só a transferência de calor é simplificada nos estágios onde os platôs não têm contato.

A compressão do vapor na entrada da seção de retificação permite o aumento da temperatura do vapor, isto aumenta o fluxo e as taxas de vapor na seção. Nas configurações de coluna CDIIC apresentaram resultados favoráveis na convergência e obtenção de dados o que favorece na obtenção de resultados e pesquisa da configuração.

Na tabela 2 apresenta os resultados obtidos das simulações das diferentes configurações. Os dados obtidos do consumo requerido pelo refeedor e o condensador de cada coluna, para as configurações de coluna CDIIC foi adicionado às condições de operação do compressor.

Tabela 2 Resultados das simulações de Coluna convencional e colunas CDIIC

Configuração	Q Refer. (Btu/h)	Q Cond. (Btu/h)	Fração Benc. (topo)	Fração Tol. (fundo)
CC	3156977	-2748670	0.95	0.91
CDIIC meio	3112675	-2101650	0,85	0,88
CDIIC topo	3000235	-2001250	0,9	0,87
CDIIC fundo	3112675	-2112435	0,89	0,9
CDIIC total	2542495,23	-3880041	0,91	0,9

Configurações satisfatórias da coluna CDIIC foram comparadas com a coluna convencional, assim, pode se notar uma diminuição significativa do consumo energético nas configurações com integração de calor.

As diferenças nas configurações de coluna CDIIC, apresentam a variação no consumo energético para a separação de estudo, onde a configuração total separa a mistura de estudo com a menor quantidade de energia. É notório o grande potencial na diminuição no consumo de energia em colunas com integração interna de calor, como se apresenta na Tabela 2 a configuração total diminui ao máximo a carga energética requerida pelo refeedor.

Observasse que para separações de misturas com pontos de ebulição parecidos a coluna CDIIC apresenta uma recuperação igual à coluna convencional, diminuindo o consumo de energia necessário para a separação. O comportamento das taxas de refluxo muda com respeito à coluna convencional devido ao aumento da pressão do sistema, por isto o produto de topo e de fundo é uma função da geometria de prato e o desenho de coluna.

A configuração de coluna CDIIC total apresenta diminuição no consumo de energia com respeito á convencional. A configuração da coluna CDIIC de alimento meio apresento diminuição no consumo de energia mais a recuperação foi baixa comparada com as outras. A configuração de topo favorece a recuperação do benceno, pero apresenta baixa recuperação de tolueno. De outra maneira a configuração de fundo favorece a recuperação do componente tolueno e baixa do componente benceno.

7. Conclusões

A separação da mistura benceno/tolueno é de grande importância na indústria, pouco eficiente em processos de destilação. O presente trabalho apresento o comportamento de quatro diferentes configurações de coluna de destilação com integração interna de calor CDIIC e os consumos requeridos no proceso, para separa esta mistura, os resultados obtidos em termos de energia forem comparados com a coluna convencional. Pode-se observar que o numero de estágios para uma separação eficiente na coluna convencional pode ser o mesmo na coluna CDIIC. Uma vantagem significativa da coluna CDIIC comparada com a convencional, é a diminuição n altura da coluna e relações de refluxo mais baixas.

A transferência da seção de retificação para a seção de agotamento é fator fundamental para obter uma melhor transferência entre seções. A coluna CDIIC se encontra limitada por a energia requerida por o compressor para o aumento da pressão na seção de retificação, um aumento significativo na pressão requer maior energia pelo compressor.

O estudo permite observar que o rendimento da coluna CDIIC depende da configuração escolhida, para uma mesma mistura. Para a mistura de estudo o melhor comportamento foi apresentado na configuração onde o intercâmbio do calor é ao longo da coluna. Para efeitos da simulação os estágios foram interconectados de maneira correspondente pelo meio de correntes de energia.

A importância deste trabalho é enfocada a apresentar a eficiência energética da coluna CDIIC, e a perspectiva de trabalho presente nesta configuração para a diminuição no consumo energético. Esta configuração apresentam grandes possibilidades para a diminuição da energia consumida em processos de destilação.

Neste trabalho se comparo a coluna convencional com respeito à diferentes configurações de coluna CDIIC, a transferência de calor da seção de retificação para a seção de agotamento é fundamental para o desenvolvimento desta tecnologia. Devem ser estudado posteriormente o prato ótimo de alimento e refluxo da coluna. A coluna CDIIC apresenta uma grande perspectiva em processos de destilação para a diminuição do consumo de energia.

8. Referências

- Cheng, H. C.; Luyben, W. Heat-integrated distillation columns for ternary separation. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 24(3), 707-713, 1985.
- Gadalla, M.; Olujic, Z.; Sun, L.; DE Rijke, A.; Jansens, J. Pinch analysis-based approach to conceptual design of internally heat-integrated distillation columns. *Trans IChemE. Part A*, 987-993, 2005.
- Gadalla, M.; Olujic, Z.; Esteller, L. J.; Gosálbez, G. G. A design method for internal heat integrated distillation columns (iHIDiCs). 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering-ESCAPE 17. 2007.
- Mah, R.; Nicholas, J.J.; Wodnik, R. B. Distillation with secondary reflux and vaporization, a comparative evaluation. *AIChE J.* 23,651-658, 1977.
- Naito, k.; Nakaiwa, m.; Huang, k.; Endo, a.; Aso, k.; Nakanishi, t.; Nakamura, t.; Noda, h.; Takamatsu, t. Operation of a bench-scale ideal heat integrated distillation column (hidic): an experimental study. *Computers and chemical engineering.* 24, 495-499, 2000.
- Nakaiwa, m.; Huang, k.; Owa, m.; Akiya, t.; Nakane, t.; Sato, m.; Takamatsu, t. Energy savings in heat-integrated distillation columns. *Energy.* 22(6), 621-625, 1997.
- Nakaiwa, m.; Huang, k.; Owa, m.; Akiya, t.; Nakane, t. Operation an ideal heat integrated distillation column with different control algorithms. *Computers chem. Engng.* 22, S389-s393, 1998a.
- Nakaiwa, m.; Huang, k.; Owa, m.; Akiya, t.; Nakane, t.; Sato, m.; Takamatsu, t.; Yoshitome, h. Potential energy savings in ideal heat-integrated distillation column. *Applied thermal engineering.* 18, 1077-1087, 1998B.

- Nakaiwa, m.; Huang, k.; Naito, k.; Endo, a.; Owa, a.; Akiya, t.; Nakane, t.; Takamtsu, t. A new configuration of ideal heat integrated distillation columns. Computer and chemical engineering. 24, 239-245, 2000.
- Nakaiwa, m.; Huang, k.; Endo, a.; Ohmori, t., Akiya, t.; Takamatsu, t. Internally heat-integrated distillation column: a review. Trans icheme. 81(A), 162-177, 2003.
- Olujic, z.; Sun, l.; De reijke, a.; Jansens, p. J. Conceptual design of an internally heat integrated propylene-propane splitter. Energy. 31, 3083-3096, 2006.
- Olujic, z.; Sun, l.; Gadalla, m.; Rijke, a.; Jansens, p. J. Enhancing thermodynamic efficiency of energy intensive distillation columns via internal heat integration. Chem. Biochem. Eng. Q. 22(4), 383-392, 2008.
- Pulido, j. L. Estudo de um novo conceito de coluna de destilação: coluna de destilação com integração interna de calor (cdiic). Universidad estadual de campinas, 2011.
- Pulido, j. L.; Martinez, e l; wolf, m. R.; Filho, r. M. Heat transfer study of heat integrated distillation column (hidic) using simulation techniques. Aip - iaeng transactions on engineering technologies, vol 6, 242-254, 2011.
- Pulido, j. L. Estudio de u nuevo concepto de columna de destilación: columna de destilación con integración interna de calor 'hidic'. Universidad industrial de santander. Tesis de grado de ingeniero químico. 2008.
- Tondeur, d and kvaalen, e. Equipartition of entropy production. An optimal criterion for transfer and separation processes. Ind. Eng. Chem. Res. 26, 50-56, 1987.