



VIII-Oktoberforum – PPGEQ

20, 21, 22 e 23 de outubro de 2009

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE PRATOS VALVULADOS DE DOIS PASSES COM DOWNCOMER DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO INDUSTRIAL

Pedro Luís Invernici, Argimiro Resende Secchi, Talita Furlanetto Mendes

Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Rua. Eng. Luis Englert, s/n. Campus Central. CEP: 90040-040 - Porto Alegre - RS - BRASIL,
E-MAIL: pedro.invernici@braskem.com.br

Resumo: Este artigo aborda a predição da eficiência de pratos valvulados de dois passes, de escoamento cruzado com downcomers de uma coluna de destilação industrial, através do uso de diferentes modelos com e sem o uso do modelo das regiões estagnadas (SRM) proposto por Lockett em 1986. Contrariando o esperado, poucos artigos foram publicados sobre as principais características de pratos valvulados e bem menos sobre eficiência de pratos valvulados de dois passes. No caso estudado, os resultados encontrados sugerem que a correlação de O'Connell, o modelo de Chan e Fair aplicado aos pratos valvulados de dois passes convertidos para um passe e o modelo de Chan e Fair com uso do método SRM são os que melhor predizem a eficiência de pratos valvulados de dois passes, de escoamento cruzado com downcomers. Em consonância com os estudos prévios, a correlação de O'Connell subestima o valor da eficiência, mostrando-se levemente conservativa, enquanto as predições pelo uso do modelo de Chan e Fair e do modelo modificado de Chan e Fair com uso do comprimento equivalente proposto por Klemola e Ilme superestimam o valor da eficiência, mostrando-se levemente não-conservativas.

Palavras-chave: Destilação fracionada. Eficiência de prato. Coluna de destilação.

1 Introdução

Na destilação, a maior separação possível com uso de pratos é atingida quando a fase vapor e a fase líquida, que saem do mesmo prato, estão em equilíbrio. A este estágio dá-se o nome de estágio ideal ou prato teórico.

Na prática, as condições de equilíbrio entre o vapor e o líquido são raramente atingidas. As eficiências são usadas para comparar a separação de um prato real da separação de um prato teórico inserindo as não-idealidades nos modelos de separação por estágios de equilíbrio.

A eficiência de prato é um fator crucial no projeto e na análise de colunas de destilação porque relaciona o número de estágios teóricos com o número de pratos reais.

O procedimento normal de projeto é calcular o número de estágios teóricos com ajuda de modelos rigorosos, disponíveis nos pacotes de simuladores de processos. A conversão para pratos reais requer a predição da eficiência local (eficiência de ponto, E_{OG}), seguida pela transformação deste valor para o prato inteiro (eficiência de Murphree, E_{MV}). Deste último valor, o número requerido de pratos reais na coluna é calculado através da eficiência global (E_{OC}).

A eficiência de ponto (E_{OG}) é relacionada com a eficiência de prato de Murphree (E_{MV}) através do uso de

correlações que levam em conta o escoamento do fluido sobre o prato. Um importante parâmetro para o projeto do prato, que afeta sua eficiência, é o comprimento do caminho do líquido (KLEMOLA e ILME, 1997a).

É um desafio conseguir a melhor seqüência de métodos e correlações para a estimativa da eficiência global de uma coluna, sabendo que uma operação unitária tão bem estudada quanto à destilação sofra de uma quantidade grande de problemas de predição de eficiência não resolvidos (GARCIA e FAIR, 2000a).

O prato valvulado de fluxo cruzado de um passe para promover o contato entre o vapor e líquido é o tipo mais simples usado na destilação e o mais encontrado na indústria. Entretanto, quando a vazão de líquido é proporcionalmente mais alta, quando comparada com a vazão de vapor, ou quando o diâmetro da coluna é grande, é necessário utilizar pratos de dois, três e, às vezes, até mais passes para melhorar as características hidráulicas do escoamento.

A geometria dos pratos valvulados de dois passes de fluxo cruzado difere significativamente da geometria de pratos de um passe. No prato de dois passes, o líquido escoar para o prato de baixo através de dois downcomers laterais e, então, horizontalmente através de duas áreas de contato vapor-líquido do prato inferior (dois painéis),

extravasando pelo vertedouro para o downcomer central e assim sucessivamente.

Vários métodos empíricos e semi-empíricos têm sido propostos para a determinação da eficiência de ponto e de prato. Neste trabalho, especial atenção foi dada aos modelos de O'Connell (1946), Chan e Fair (1984), Garcia (1999) e modificações nos últimos dois modelos pela introdução do conceito de comprimento equivalente (C_E) proposto por Klemola e Ilme (1997b). Uma revisão mais abrangente dos trabalhos publicados sobre os modelos para predição das eficiências pode ser encontrada em Invernici (2009).

A correlação de O'Connell (1946) vem sendo usada como padrão na indústria durante décadas. Baseia-se na volatilidade relativa e na viscosidade do líquido da carga, ambas tomadas na média aritmética da temperatura no topo e no fundo da coluna.

O modelo de Chan e Fair (1984) é considerado um aperfeiçoamento do método do *AICHE* (LOCKETT, 1986), possui uma abordagem da hidrodinâmica do prato menos complexa quando comparada ao modelo de Garcia (1999). O modelo é recomendado para simuladores e é de fácil convergência. Foi desenvolvido para pratos perfurados, com borbulhadores e valvulados (KLEMOLA e ILME, 1997a apud DOMINGUES, 2005).

Klemola e Ilme (1997b) propuseram um método de cálculo da eficiência de Murphree (E_{MV}) onde a geometria dos pratos de dois passes é convertida para a geometria de prato de um passe, mantendo-se a área ativa do prato e o diâmetro da coluna constante. O comprimento do caminho do líquido para prato de um passe equivalente deve ser considerado como a soma dos comprimentos dos caminhos do líquido do prato de dois passes.

Garcia (1999) apresentou um modelo teórico para estimar a eficiência de pratos perfurados com downcomer. Foi um aperfeiçoamento do modelo proposto por Prado (1986), para sistemas não-aquosos, no qual foram consideradas três regiões: a região próxima aos furos, onde o gás pode estar em regime de escoamento de jato (jet) ou borbulhamento, a região de espuma, a qual é composta por bolhas de gás dispersas no líquido e a zona de spray.

Nesse trabalho, propõe-se avaliar a eficiência de pratos valvulados de escoamento cruzado de dois passes com downcomer, utilizando vários métodos que permitem o cálculo dos pratos pares e ímpares, os quais possuem geometrias diferentes. Tens-se a intenção de ampliar os estudos de Domingues (2005) que buscou estabelecer caminhos apropriados para a estimativa da eficiência de pratos valvulados de um passe com downcomer e pratos *dualflow*.

2 Fundamentos teóricos

A compreensão dos conceitos básicos utilizados para o cálculo de eficiência de ponto, de pratos e global de colunas de destilação em muito auxilia no entendimento deste trabalho. A apresentação, na literatura, destes conceitos nem sempre é clara e, frequentemente, gera mal entendido e confusões.

A eficiência global da coluna (E_{OC}) é definida como a razão entre o número de estágios teóricos (N_T) requeridos para uma determinada separação e o número de pratos reais da coluna (N_R), a uma dada razão de refluxo.

$$E_{OC} = \frac{N_T}{N_R} \quad (2.1)$$

A eficiência de ponto (E_{OC}) é definida pela variação da fração molar de um componente em um ponto do prato pela variação na fração molar desse componente, no mesmo ponto, que deveria ocorrer considerando o estágio teórico.

Os fundamentos teóricos da eficiência de ponto são apresentados por Lockett (1986) e Kister (1992). A teoria baseia-se na resistência à transferência de massa entre os filmes de vapor e líquido na interface de vapor-líquido. A eficiência de ponto é obtida a partir do número global de unidades de transferência de massa (N_{OG}), referido à fase vapor, usando:

$$E_{OG} = 1 - \exp(-N_{OG}) \quad (2.2)$$

Como a fração molar do componente em um dado ponto do prato não pode exceder a de equilíbrio, a eficiência de ponto (E_{OG}) é sempre menor que 1.

A equação que define a eficiência de prato de Murphree (E_{MV}) é semelhante à que define a eficiência de ponto, exceto que se toma a concentração média da mistura de vapor que sai e que entra no prato n.

$$E_{MV} = \left(\frac{\bar{y}_n - \bar{y}_{n-1}}{\bar{y}_n^* - \bar{y}_{n-1}} \right) \quad (2.3)$$

A relação entre a eficiência de prato de Murphree (E_{MV}) e a eficiência de ponto (E_{OG}), depende de modelo de mistura do líquido acima do prato.

Em geral, nos pratos com escoamento cruzado, o valor da eficiência de prato de Murphree (E_{MV}) é maior do que o da eficiência de ponto (E_{OG}). O líquido acima dos pratos nunca é perfeitamente misturado na direção horizontal do prato e um gradiente de concentração é estabelecido no líquido que se move ao longo do prato. Por sua vez, isto causa um gradiente de concentração no vapor que deixa o prato. A existência de um gradiente de concentração do componente no líquido que escoou sobre o prato resulta em um aumento da eficiência de prato de Murphree (E_{MV}), fazendo com que, em alguns casos, essa eficiência exceda a 100%.

Lewis (1936 apud Lockett, 1986), baseado no trabalho de Krischbaum, que encontrou consideráveis variações de concentração de líquido através dos pratos, foi o primeiro a desenvolver relações quantitativas entre E_{MV} e E_{OG} para situações nas quais não ocorre mistura de líquido na direção horizontal do prato (plug flow), introduzindo modificações no método de McCabe-Thiele para retificação de misturas binárias.

Os três casos considerados por Lewis são:

Caso 1: O vapor está completamente misturado entre os pratos e a direção do líquido não é levada em conta.

Caso 2: O vapor não está misturado entre os pratos e o líquido flui na mesma direção em todos os pratos.

Caso 3: Vapor não está misturado entre os pratos e o líquido flui em direções alternadas nos sucessivos pratos.

A partir da eficiência de prato de Murphree pode-se estimar a eficiência da coluna utilizando a Equação 2.4, quando as inclinações das linhas de equilíbrio e de operação forem constantes:

$$E_{oc} = \frac{\ln[1 + E_{MV}(\lambda - 1)]}{\ln \lambda} \quad (2.4)$$

onde λ é a razão entre a inclinação da curva de equilíbrio (m) e a curva de operação (G'/L'):

$$\lambda = m \cdot \left[\frac{\left(\frac{M_G}{MW_G} \right)}{\left(\frac{M_L}{MW_L} \right)} \right] = m \cdot \frac{G'}{L'} \quad (2.5)$$

Em misturas binárias, a eficiência de troca de massa entre dois componentes é idêntica, mas em separações multicomponentes as eficiências de troca de massa dos componentes são diferentes. Kister (1992) detalha as razões para estas diferenças, chamando a atenção para as diferentes difusividades dos componentes, tanto na fase vapor como na líquida, e para as diferentes inclinações da curva de equilíbrio (m) e curvas de operação de cada componente.

Para sistemas multicomponentes, a determinação da inclinação da curva de equilíbrio pode ser feita pelo uso do procedimento proposto por Chan e Fair (1984b). O procedimento, chamado de método pseudo-binário, é simples e de fácil aplicação. (KISTER, 1992). O único cuidado é ter algum conhecimento para a seleção dos componentes chave-leve e chave-pesado (LOCKETT, 1986 apud DOMINGUES, 2005).

A aplicação do método pseudo-binário dá-se, primeiramente, pelo cálculo do teor do pseudo-chave leve nas fases vapor e líquida.

$$Y_{LK} = \frac{y_{lk}}{y_{lk} + y_{hk}} \quad (2.6)$$

$$X_{LK} = \frac{x_{lk}}{x_{lk} + x_{hk}} \quad (2.7)$$

e, após, calcula-se a inclinação da curva de equilíbrio:

$$m = \frac{(Y_{LK})_{n+1} - (Y_{LK})_n}{(X_{LK})_{n+1} - (X_{LK})_n} \quad (2.8)$$

A simplicidade, boa aceitabilidade (KISTER, 1992) e a fácil implementação levaram-nos a adotar o método pseudo-binário neste trabalho.

Uma vez que a geometria dos pratos de duplo passe difere da geometria dos pratos de um passe é necessário fazer considerações específicas para este tipo de prato.

Bolles (1976) propôs um método para prever o efeito da geometria dos pratos na distribuição de líquido e vapor entre os vários passes e seus reflexos na eficiência média do prato, bem como projetar pratos multipasses perfurados, valvulados ou com borbulhadores de fluxo

cruzado com downcomers de dois, três e quatro passes com ótima eficiência e distribuição de fluxo.

Os resultados apresentados indicam que os pratos de dois passes não apresentam problemas especiais na distribuição. Os fluxos de líquido e o vapor distribuem-se igualmente entre os passes e a eficiência média de prato de Murphree (E_{MV}) é essencialmente igual à média aritmética das eficiências dos passes individuais.

No entanto, o estudo de Bolles (1976) não aborda a redução da eficiência causada pela existência de regiões estagnadas de líquido sobre o prato multipasse.

O estudo do Modelo de Regiões Estagnadas (SRM) tem uma grande importância no desenvolvimento das características geométricas dos pratos modernos, tais como, do prato SUPERFRAC® da KOCH-GLITSCH e do prato VGPlus® da SULZER CHEMTECH. O uso das observações das zonas de estagnação do líquido sobre o prato, produzidas em testes laboratoriais, deu origem a uma nova geração de pratos, onde se procura minimizar e até eliminar as regiões de estagnação.

O modelo mais aceito para avaliação dos efeitos da má distribuição do líquido sobre os pratos para o cálculo da eficiência dos pratos foi o proposto por Lockett (1986) e recebeu o nome de modelo de regiões estagnadas (SRM) (KISTER, 1992).

O modelo postula que o escoamento de líquido sobre o prato ocorre por mecanismo de escoamento empistonado no centro do prato com zonas de estagnação perto das paredes das colunas. As zonas estagnadas são definidas de forma simplificada pelas áreas compreendidas entre a parede da coluna e as cordas que ligam o final do downcomer de entrada e o downcomer de saída.

Nos pratos de fluxo cruzado, o líquido que emerge do downcomer lateral em uma seção divergente onde ocorrem severas canalizações. No modelo de mistura *backmixing*, o efeito das canalizações não é levado em conta, uma vez que o perfil de velocidade do líquido é considerado uniforme e o líquido escoar pelo prato como se estivesse em um prato retangular não considerando os efeitos causados pela parede da coluna.

Canalizações de líquido são usualmente associadas aos escoamentos em canais divergentes e somente quando o líquido escoar do downcomer lateral para o central. Neste caso, o líquido entra em uma região divergente e tem pouca tendência de se mover para os lados para seguir a curva da parede da coluna. O líquido tende a escoar por um canal preferencial que é a menor distância entre os dois downcomers, havendo regiões de baixa velocidade e de estagnação nas laterais dos pratos. Conforme descrito em Lockett (1986), como não há escoamento de líquido nas regiões de estagnação, o líquido entra rapidamente em equilíbrio com o vapor, fazendo com que o vapor que passa por essas regiões não altere mais sua composição. Como o objetivo do prato é mudar a composição do vapor, ocorre uma redução da eficiência do prato.

Este autor observa que as considerações acima são simplificações e que Porter et al. (1972 apud LOCKETT, 1986), demonstraram que, para pratos com pequenos diâmetros, há uma reposição dos componentes leves removidos pelo vapor nas regiões estagnadas, devido à mistura transversal com o líquido da região ativa. Entretanto, este efeito ocorre em uma distância limitada, onde a máxima largura das regiões de estagnação é menor

do que 0,5 m, sendo independente do diâmetro do prato. Assim, quanto maior o diâmetro do prato, mais significativo tende a ser o efeito de estagnação de líquido na eficiência dos pratos.

No caso de pratos de um passe, é esperado que as zonas de líquido estagnado causem uma redução significativa da eficiência, especialmente em colunas com grande diâmetro, contendo um grande número de pratos. Isto é causado porque as regiões de estagnação são alinhadas – uma no topo da outra, e assim, o vapor pode percorrer vários pratos sem alterar sua composição.

Colunas com pratos de dois passes têm a vantagem de diminuir os efeitos das zonas de líquido estagnado. A composição do vapor modifica-se com a alternância da geometria dos pratos o que produz um aumento na eficiência, compensando parte da eficiência perdida pelo prato ter um menor comprimento do caminho do líquido.

Lim et al. (1974) mostraram que a máxima eficiência para pratos de um passe com escoamento cruzado é atingida com um diâmetro de coluna de aproximadamente 2,1 m e para pratos de dois passes em torno de 2,7 m.

Porter et al. (1972) apresentaram um modelo de escoamento para prato valvulado de fluxo cruzado de um passe no qual foi assumido que o líquido que emerge do downcomer de entrada escoava através do prato diretamente para o downcomer de saída sem se espalhar para os lados.

O padrão de escoamento, similar ao adotado por Lim et al. (1974), é mostrado, esquematicamente, na Figura 2.1. Na Região I, o líquido escoava através do prato com velocidade uniforme. Já o líquido da Região II fica estagnado e não é renovado pelo líquido que cruza o prato.

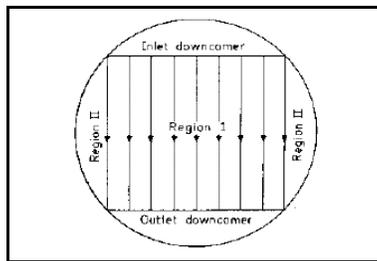


Figura 2.1: Padrão de escoamento de líquido considerado por Porter et al. (1974)

Superposto ao padrão de escoamento, tem-se o movimento aleatório das partículas de líquido causado pelo borbulhamento do vapor que causa *backmixing* na região I e troca de líquido entre a Região I e II.

De acordo com Porter et al. (1972), para prato de grande diâmetro, a eficiência de Murphree pode ser calculada pela Equação 2.9.

$$\left[\frac{E_{MV}}{E_{OG}} \right]_L = \frac{A_I}{A_A} \cdot \left[\frac{E_{MVI}}{E_{OG}} \right] \quad (2.9)$$

onde A_I é a área da Região I do prato e A_A é a área de borbulhamento do prato

Para o cálculo da eficiência de prato de Murphree modificada (E_{MVI}), Porter et al. (1972) sugerem o uso dos modelos de mistura de líquido sobre o prato de Lewis (1936) com correções para o cálculo do número de Peclet e

do λ , que expressa a razão entre a inclinação da curva de equilíbrio (m) e a curva de operação (L'/G').

No cálculo da área da região de estagnação de líquido, adotou-se a área do trapézio, tendo como a base menor a largura do downcomer lateral e base maior o resultado da correlação que permite o cálculo da largura efetiva do downcomer dos pratos com escoamento da lateral para o centro, proposta por Lockett e Banik (1981 apud LOCKETT, 1986, p. 196).

$$\frac{L_{WE}}{D_T} = 0,5 \cdot \frac{L_W}{D_T} + \frac{\left(\frac{0,5 \cdot \pi}{180} \right) \arcseno \left\{ \left[1 - \left(\frac{L_W}{D_T} \right)^2 \right]^{0,5} \right\}}{\left[1 - \left(\frac{L_W}{D_T} \right)^2 \right]^{0,5}} \quad (2.10)$$

onde, L_{WE} é o comprimento da corda equivalente de pratos com downcomer - SRM , L_W é o comprimento da corda de pratos com downcomer e D_T é o diâmetro da coluna.

Nos modelos de cálculo de eficiência desenvolvidos neste trabalho não se incluiu o impacto do gotejamento em pratos valvulados na eficiência de prato, pois se verificou ser muito baixo ou nulo no caso de pratos valvulados.

Algumas modificações foram introduzidas com o intuito de melhor ajustar os modelos para pratos valvulados de dois passes com downcomer. O fator de capacidade foi calculado utilizando a correlação proposta por Kister e Hass (1990), obtendo-se um melhor ajuste do fator de inundação da coluna.

A área de slot (A_S) é o parâmetro característico de operação de um prato valvulado, sendo definido como a área da cortina vertical através da qual o vapor passa na direção horizontal ao sair da válvula.

Para o cálculo das relações entre as dimensões do prato utilizadas para conversão do prato de dois passes para prato de um passe (KLEMOLA, 1997b), foram utilizadas as equações sugeridas por Navaes (2007).

Os modelos e correlações foram sistematizados no simulador Aspen Plus 2006 para a simulação da coluna industrial de fracionamento de butadieno. Desenvolveu-se um algoritmo iterativo de cálculo da eficiência de prato de Murphree e eficiência global, reunindo todos os modelos e correlações escolhidas, em conjunto com a geometria dos pratos, propriedades físicas e condições operacionais da coluna. O algoritmo foi inserido no simulador *Aspen Plus 2006*, em programação em Fortran 77, dentro do bloco *flowsheeting options - calculator*, permitindo o cálculo da eficiência global da coluna e as composições de topo e fundo para os diversos modelos e correlações.

3 Resultados e Discussões

Para a validação dos modelos de predição de eficiência foram utilizados os dados coletados em teste de planta de uma coluna fracionadora de butadieno. A coluna foi modelada no simulador Aspen Plus 2006, visando a obtenção da eficiência de Murphree (E_{MV}) que após foi convertida na eficiência global real (E_{OG}), sendo comparada com as eficiências calculadas pelos modelos de predição.

As características de projeto da coluna são mostradas na Tabela 3.1 abaixo:

Tabela 3.1: Dados de projeto da coluna

Fracionadora de Butadieno	
Diâmetro, d_c (m)	2,26
Altura (m)	52,5
Nº de pratos	85
Prato de carga	30
Valvulado de dois passes	
tipo V-1 Glitsch	
Diâmetro da válvula, d_H (mm)	39-40
Espaçamento entre pratos, T_S (m)	0,45
Fração perfurada do prato, (%)	7,93
Área ativa, A_A (m ²)	2,98
Altura do vertedouro, h_W (mm)	51
Comprimento do vertedouro lateral, L_W (m)	1,35
Comprimento do vertedouro central, L_W (m)	2,23
Chave leve	1,3 butadieno
Chave pesado	Cis-2-buteno

3.1 Eficiências globais da coluna

A Figura 3.1 mostra a comparação das eficiências globais (E_{OC}) calculadas pelos diversos modelos em relação à eficiência global ajustada no simulador para a fracionadora de butadieno. Foram admitidas linhas de variação de $\pm 10\%$, que se mostra um desvio aceitável quando do projeto dos números de prato de uma coluna.

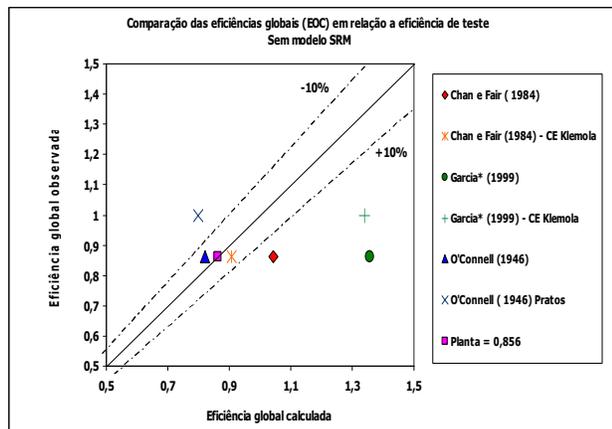


Figura 3.1: Comparação das eficiências globais previstas (E_{OC}) em relação à eficiência global ajustada no simulador para a fracionadora de butadieno – sem o modelo SRM.

Verifica-se na Figura 3.1 que a eficiência global (E_{OC}) calculada pelo modelo modificado de Chan e Fair (1984) com uso do comprimento equivalente (C_E) recomendada por Klemola e Ilme (1997b) e pela correlação proposta por O’Connell (1946) apresentam os menores desvios.

A eficiência global calculada pelo modelo de Chan e Fair (1984) mostrou-se não conservativa apresentando um desvio positivo de 21,0% em relação à eficiência ajustada.

Os resultados das eficiências globais (E_{OC}) com o uso do modelo de Garcia (1999) e Garcia modificado apresentam um desvio em relação à eficiência ajustada de 57,4% e 55,4% respectivamente, superestimando os valores das eficiências e desaconselhando o uso destes métodos para o cálculo da eficiência global de pratos de duplo passe de fluxo cruzado.

3.2 Eficiências globais da coluna – modelos propostos

com uso do modelo SRM

A Figura 3.2 mostra a comparação das eficiências globais (E_{OC}) calculadas pelos diversos modelos em relação à eficiência global ajustada no simulador para a fracionadora de butadieno utilizando-se o modelo SRM.

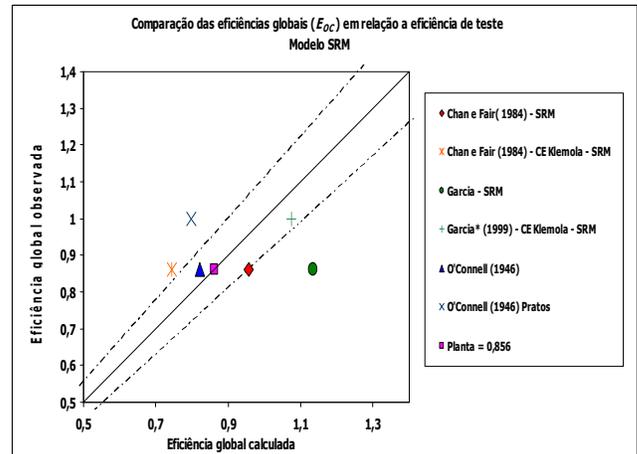


Figura 3.2: Comparação das eficiências globais (E_{OC}) em relação à eficiência global ajustada no simulador para a coluna testada – uso do modelo SRM

Através da Figura 3.2, verifica-se que os valores da eficiência global da coluna (E_{OC}) calculada pelo modelo de Chan e Fair (1984) com uso do SRM e pela correlação de O’Connell (1946) apresentam os menores desvios.

A eficiência global calculada pelo modelo de Chan e Fair (1984) com modelo SRM mostrou-se não-conservativa apresentando um desvio positivo de 10,9 % em relação à eficiência ajustada.

Os resultados das eficiências globais da coluna (E_{OC}), obtidas com o modelo de Garcia (1999) e Garcia modificado com uso do SRM mostraram-se mais ajustados do que os calculados pelos mesmos modelos sem o uso do SRM, apresentando um desvio em relação à eficiência global ajustada de 31,7% e 24,5%, respectivamente, o que superestima os valores dessas eficiências.

Os modelos modificados de Chan e Fair (1984) e Garcia (1999) pelo uso de C_E e do modelo SRM não apresentaram ajustes aceitáveis para a composição do 1,3 butadieno de fundo da coluna, o que invalida o uso dos mesmos para o cálculo da eficiência global (E_{OC}) da coluna testada.

4 Conclusões

A transferência simultânea de calor e massa combinada com a complexa hidráulica de fluido em duas fases faz da destilação um vasto campo para análises de seus fundamentos. A destilação tornou-se uma operação bem estabelecida muito antes que as modernas teorias de transferência de massa fossem consolidadas. Por isso, a tendência comum da maioria das pesquisas em destilação ainda mantém sua natureza empírica, semi-empírica ou mecanicista. É neste cenário que foram obtidas as conclusões deste trabalho.

A correlação de O'Connell (1946) apresentou um bom ajuste da eficiência global da coluna (E_{OG}), o que corrobora sua adoção como padrão na indústria ainda hoje.

Uma vez que a correlação não leva em conta os fatores hidráulicos dos pratos, nenhuma informação é obtida em relação aos fenômenos que ocorrem na transferência de massa nos pratos e pouco agrega no entendimento dos fatores-chaves dos atuais projetos de pratos e pouco ou nada contribui para o desenvolvimento de novos modelos.

O modelo de Chan e Fair (1984) apresentou desvios nas eficiências de prato de Murphree dentro dos limites previstos pelos próprios autores do método.

A introdução do modelo SRM (*Stagnant Regions Model*) ao modelo de Chan e Fair (1984) conduziu a menores desvios, quando comparado ao modelo de Chan e Fair (1984), mas os resultados ainda superestimaram os valores das eficiências de prato de Murphree.

O modelo de Chan e Fair (1984) associado ao modelo proposto de Klemola e Ilme (1997b) referente à conversão do prato de dois passes para prato de um passe, mantendo-se a área ativa ou de borbulhamento (A_A) do prato de dois passes, representou de forma adequada a eficiência de prato da coluna estudada, validando o uso deste modelo como uma alternativa de rápida e fácil implementação.

O modelo de Garcia (1999) com e sem o uso do modelo SRM apresentou desvios significativos em relação à eficiência de prato quando comparada com a eficiência da coluna testada ajustada no simulador, o que demonstra que é necessário avançar no desenvolvimento deste modelo. No entanto, cabe destacar que o modelo de cálculo de eficiência de ponto (E_{OG}) de Garcia (1999) aprofunda o conhecimento até então disponível dos fenômenos de transferência de massa que ocorrem sobre o prato.

Em síntese, a correlação de O'Connell (1946) foi a que melhor representou a eficiência global da coluna testada, sendo recomendada para a predição da eficiência global de colunas dotadas de pratos valvulados de dois passes com downcomer. O modelo de Chan e Fair (1984) combinado ao modelo SRM e o modelo de Chan e Fair (1984) com o uso do comprimento equivalente (CE) proposto por Klemola e Ilme (1997b) superestimam levemente a eficiência global da coluna. No entanto, esta dificuldade pode ser contornada utilizando-se um fator de correção que leve em consideração no cálculo do número de pratos reais da coluna os desvios apresentados pelos dois métodos.

Trabalhos futuros poderão confirmar e expandir os resultados aqui relatados para pratos valvulados de dois passes e fluxo cruzado.

Por fim, ressalta-se que os resultados aqui encontrados são baseados em estudo de uma única coluna e sua representatividade deve ser tomada com a devida precaução.

Lista de siglas

G'	Vazão molar de vapor por área de borbulhamento, kmol / (m ² .s)
L'	Vazão molar de líquido por área de borbulhamento, kmol / (m ² .s)
L_w	Comprimento da corda de pratos com downcomer, m
M_G	Vazão mássica de vapor, kg/s
M_L	Vazão mássica de líquido, kg/s
M_{WG}	Massa molecular da mistura de líquido, kg/kmol
M_{WL}	Massa molecular da mistura de vapor, kg/kmol
X_{LK}	Fração molar do pseudo-binário chave leve no líquido

x_{hk}	Fração molar do chave pesado no líquido
x_{lk}	Fração molar do chave leve no líquido
Y_{LK}	Fração molar do pseudo-binário chave leve no vapor
y_{hk}	Fração molar do chave pesado no vapor
y_{lk}	Fração molar do chave leve no vapor
y	Fração molar no vapor
\bar{y}_n	Valor médio de y no vapor deixando o prato n
y_n^*	Fração molar do vapor que está em equilíbrio com o líquido no prato n

5. Referências

- BOLLES, W. L. Estimating Valve Tray Performance. *Chem. Eng. Progress*, p. 43-50, 1976.
- CALDAS, J.N.; LACERDA, A.I.; VELOSO, E.; PASCHOAL, L.C.M. *Internos de Torres*. Rio de Janeiro: Interciência, 2007. 509 p.
- CHAN, H.; FAIR, J. R. Predict of Point Efficiencies on Sieve Trays. 1. Binary Systems. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, v. 23, n. 4, p. 814-819, 1984.
- DOMINGUES, T.L. *Avaliação da eficiência se pratos valvulados com downcomer e pratos dualflow em colunas de destilação industriais*, 2005. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
- GARCIA, J. A. *Fundamental Model for the Prediction of Distillation Sieve Tray Efficiency: Hydrocarbon and Aqueous Systems*. Austin: The University of Texas at Austin, 1999. Tese de Doutorado, The University of Texas at Austin, 1999.
- GARCIA, J. A.; FAIR, J. R. A Fundamental Model for the Prediction of Distillation Sieve Tray Efficiency. 1. Database Development. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 39, n. 6, p. 1809-1817, 2000.
- INVERNICI, P.L. *Avaliação da eficiência de pratos valvulados de dois passes com downcomer de uma coluna de destilação industrial*, 2005. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- LIM, C.T.; PORTER, K.E.; LOCKETT M.J. The Effect of Liquid Channelling on Two-Pass Distillation Plate Efficiency *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 52, p 193-201, 1974.
- KISTER, H.Z.; HAAS, J.R. *Chem. Eng. Progress*, v.86, n.9, p. 63, 1990.
- KLEMOLA, K. T.; ILME, J. K. Calculation Methods for the Numbers of Transfer Units on Sieve Trays. In: *AIChE Annual Meeting*, 1997a, Los Angeles.
- KLEMOLA, K. T.; ILME, J. K. Effect of Two-Pass Trays on Distillation Efficiencies. *Chem. Eng. Technol.*, v. 20, n. 7, p. 478-84, 1997b.
- LEWIS, W.K. Rectification of Binary Mixtures. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 28, n. 14, p. 339-402, 1936.
- LOCKETT, M. J. *Distillation Tray Fundamentals*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986. 226 p.
- PRADO, M.; JOHNSON, K. L., FAIR, J. R. Bubble-to-Spray Transition on Sieve Trays. *Chem. Eng. Progress*, p. 32-40, 1987.
- O'CONNELL, H.E. Plate efficiency of fractionating columns and absorbers, *Trans. Inst. Chem. Engrs*, v.42, p.741-755, 1946.
- PORTER, K.E.; LOCKETT, M.J.; LIM, C.T. The effect of liquid Channelling on Distillation Plate Efficiency., *Trans. Inst. Chem. Engrs*, v. 50, p. 91-101, 1972.