AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROJETO EM COLUNA ABSORVEDORA DE CO_2 UTILIZANDO UMA SOLUÇÃO MEA VIA SIMULAÇÕES EM ASPEN PLUS®

D. G. Sousa Junior[1], N. R. Rodrigues[1], L. P. S. Rosa[2]

[1]Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Brasil (david_eq@outlook.com)
[2]Programa de Pós-graduação em Engenharia Química - PEQ, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Brasil

Este trabalho visa avaliar a influência dos parâmetros de projeto de uma coluna absorvedora de CO_2 utilizando solução de MEA. Para tal, investigou-se o número de estágios, altura de leito e tipos de recheio através de simulações no Aspen Plus®. Os resultados mostraram remoção de 99% de CO_2 para uma altura de 7 m de recheio e 50 estágios. Entre os recheios avaliados (Mellapak 250Y, Berl, Raschig, Pall e Intalox), o Mellapak 250Y apresentou o melhor desempenho, com 99,35% de remoção.

Palavras-chave: captura de CO_2; absorção química; monoetanolamina; Aspen Plus®; parâmetros de projeto.

INTRODUÇÃO

O efeito estufa, intensificado pelo acúmulo de gases radiativamente ativos na atmosfera, é reconhecido como um dos principais desafios ambientais contemporâneos. O dióxido de carbono (CO_2) destaca-se como o principal contribuinte, sendo as emissões associadas à queima de combustíveis fósseis e processos industriais responsáveis pela maior parcela do total global (Mikhaylov *et al*., 2020). Para mitigar esses impactos e limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C, foram estabelecidos acordos internacionais como o Protocolo de Kyoto e o Acordo de Paris, que impõem metas rigorosas de descarbonização da economia (Balogh e Mizik, 2023).

O alcance dessas metas de mitigação depende da transição para uma economia de baixo carbono, do desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e da adoção de políticas comerciais que incentivem a produção e a comercialização de bens ambientalmente sustentáveis. Entre as tecnologias disponíveis para redução das emissões de CO_2, a captura e armazenamento de carbono (CCS) tem se destacado como uma solução estratégica, especialmente a absorção química em solventes, considerada a alternativa de pós-combustão mais madura para aplicação industrial (Vega *et al*., 2020; Chao *et al*., 2021). Nesse cenário, soluções à base de aminas, em especial a monoetanolamina (MEA), permanecem como solventes de referência devido à sua elevada reatividade com CO_2, boa capacidade de captura, disponibilidade comercial e facilidade de operação (Chao *et al*., 2021; Wang *et al*., 2023).

A MEA tem sido utilizada no tratamento de gases ácidos desde a década de 1960 e é considerada a amina de referência para a captura de CO_2. Ela apresenta cinética rápida, baixa viscosidade, baixo custo e ampla utilização industrial. Como desvantagens principais destacam-se a instabilidade química, alta volatilidade e corrosividade, além de elevado consumo energético no regenerador do solvente (Xu, 2011; Moioli *et al*., 2017).

O sistema CO_2–MEA–H_2O envolve cinco reações reversíveis na fase líquida: desprotonação do MEAH+, hidratação do CO_2, dissociação do HCO_3^-, hidrólise do carbamato e autodissociação da água, como pode ser visualizado na Tabela 1 (Zhang e Chen, 2013).

Tabela 1. Reações presentes na fase líquida do sistema CO_2–MEA–H_2O.

Reações	N°
$MEAH^+ \rightleftharpoons MEA + H^+$	(I)
$CO_2 + H_2O \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-$	(II)
$HCO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{2-}$	(III)
$MEACOO^- + H_2O \rightleftharpoons MEA + HCO_3^-$	(IV)
$H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$	(V)

O processo de absorção química emprega colunas de recheio onde a corrente gasosa rica em CO_2 entra na base e flui em contracorrente com a solução de MEA, que desce pelo topo. O CO_2 reage com a MEA formando carbamato, composto intermediário de

ligações fracas, que pode ser revertido no regenerador (*stripper*) mediante aquecimento entre 100 e 140°C (Koronaki *et al*., 2015).

Desse modo, as colunas recheadas são equipamentos utilizados em processos de absorção em contracorrente, nos quais o gás ascende enquanto o líquido escoa em sentido oposto, promovendo transferência de massa através dos interstícios do recheio, como mostrado na Figura 1 (Geankoplis, 1993). Esses recheios podem ser fabricados em diferentes materiais, como argila, porcelana, grafite e plástico, e devem apresentar baixa perda de carga e boa área de contato entre as fases. Assim, os recheios são classificados em randômicos e estruturados. Os randômicos são dispostos aleatoriamente na coluna, destacando-se os anéis de Raschig, anéis de Pall, selas de Berl e selas Intalox. Já os estruturados apresentam disposição ordenada, geralmente formados por chapas onduladas ou malhas metálicas, como o FLEXIPAC®, proporcionando maior área superficial e menores quedas de pressão em comparação aos recheios randômicos (Sinnott e Towler, 2019; Bruschi, 2021).

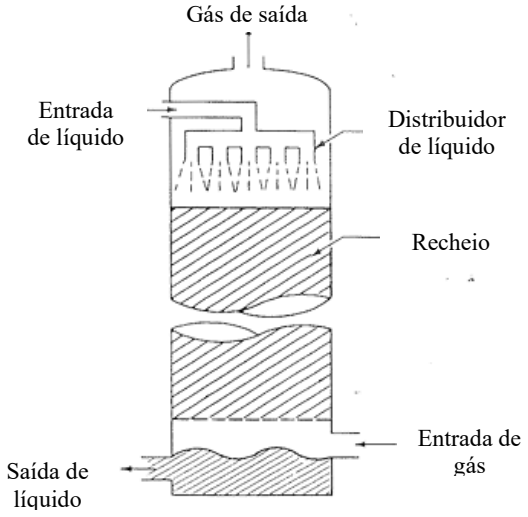


Figura 1. Esquema representativo de uma coluna de recheio.

A modelagem e simulação de processos constitui ferramenta central para a análise rigorosa desses sistemas, permitindo representar os fenômenos de transferência de massa e calor, termodinâmica eletrolítica e cinética de reação sem os elevados custos de testes em escala industrial (Madeddu, Errico e Baratti, 2018; Kiani, Jiang e Feron, 2020). Modelos baseados em taxas (*rate-based*), implementados em simuladores como o Aspen Plus®, têm demonstrado superioridade em relação a modelos de equilíbrio por etapas para a descrição de colunas reativas, como reportado por Zhang e Chen (2013). Dessa forma, vários estudos têm sido reportados pela literatura para investigar a viabilidade do processo de captura do dióxido de carbono por absorção (CO_2) em soluções de monoetanolamina (MEA) aquosa por meio de modelagem e simulação, tais como: Madeddu, Errico e Baratti (2018), Zhang e Chen (2013), Garcia *et al*. (2017), Majnoon; Hajinezhad; Moosavian (2024), Rolim (2023) e Kothandaraman *et al*. (2009).

Diante desse contexto, este trabalho busca identificar as condições operacionais que permitam uma alta taxa de captura de CO_2 respeitando as limitações operacionais e contribuindo para a redução dos custos energéticos da tecnologia. Para isso será analisada a influência da altura do recheio, do número de estágios e do tipo de recheio na eficiência de uma coluna absorvedora que utiliza MEA como solvente por meio de simulações e análise de sensibilidade conduzidas no Aspen Plus®. Inicialmente, o modelo foi validado com dados experimentais da literatura e, em seguida, empregado na análise sistemática dos parâmetros de projeto. Importante mencionar que a eficiência da coluna absorvedora é determinada por variáveis de projeto, como altura do recheio, número de estágios e tipo de recheio, que influenciam diretamente a área interfacial disponível para transferência de massa e, consequentemente, a taxa de captura de CO_2.

METODOLOGIA

As etapas metodológicas deste trabalho são divididas em três partes: configuração do Aspen Plus® para reproduzir uma coluna de absorção com recheio, condições operacionais e dados experimentais utilizados para a validação das simulações e parâmetros da coluna empregados para a análise de sensibilidade.

Modelos Termodinâmicos e Computacionais Utilizados

Para descrever o equilíbrio termodinâmico do sistema e realizar os cálculos operacionais do processo foram utilizados modelos previamente contidos no Aspen Plus®, como o pacote ELECNRTL, baseado no modelo termodinâmico eNRTL e o modelo *rate-based*, o qual o software utiliza para resolver matematicamente o equilíbrio.

O modelo NRTL de eletrólitos (eNRTL) é amplamente utilizado para descrever o comportamento não ideal de soluções eletrolíticas, combinando contribuições de interações eletrostáticas de longo alcance e interações moleculares de curto alcance. O modelo baseia-se no conceito de composição local proposto por Renon e Prausnitz (1968), incorporando as hipóteses de repulsão entre íons de mesma carga e eletroneutralidade local, o que permite representar adequadamente sistemas contendo espécies iônicas e moleculares (Liu et al., 1999; Ahmad, 2012). Devido à sua capacidade de descrever sistemas reativos com múltiplos eletrólitos e solventes, o eNRTL é amplamente empregado em

aplicações industriais e na simulação de processos de captura de CO_2 (Hessen et al., 2010).

A expressão geral do modelo é dada por:

$$ln\gamma_i^{ex*} = ln\gamma_i^{DH} + ln\gamma_{i,SR}^{ex*} \quad (1)$$

Em que $ln\gamma_i^{DH}$ representa a contribuição de longo alcance, descrita pela teoria de Debye-Hückel, e $ln\gamma_{i,SR}^{ex*}$ corresponde à contribuição de curto alcance, calculada pelos autores Chen e Song (2004).

O modelo *rate-based,* por sua vez, tem como principal vantagem a representação realista e precisa do que ocorre dentro das colunas de absorção e esgotamento. Diferente dos modelos de equilíbrio, que se baseiam na suposição simplificada de estágios teóricos ideais, a abordagem *rate-based* calcula as taxas reais de transferência de massa e calor, incorporando o fator de realce (*enhancement factor*) dependente das reações químicas (Borhani *et al*., 2021).

Configuração do Aspen Plus®

Inicialmente, os componentes do sistema foram selecionados no ambiente de propriedades do Aspen Plus® e foi utilizada a ferramenta "*Elec Wizard*" para adicionar as espécies iônicas que são formadas a partir das reações de dissociação do sistema (Tabela 1). Após isso, seleciona-se o pacote termodinâmico de interesse, como o ELECNRTL para a fase líquida e a fase vapor como gás ideal, conforme recomendado para pressões próximas à atmosférica.

Em seguida, adiciona-se os blocos para confecção do fluxograma do processo: quatro correntes de material, duas de entrada e duas de saída e uma coluna absorvedora de recheio. A Figura 2 abaixo representa o fluxograma do processo utilizado neste trabalho.

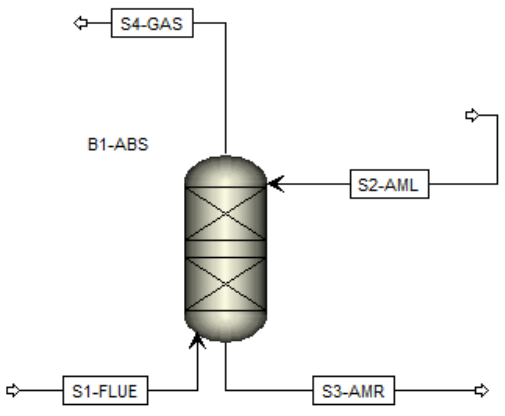


Figura 2. Fluxograma para o processo de absorção de CO_2 em Aspen Plus®.

As correlações de transferência de massa e calor de Tung e Mah (1985) e Chilton-Colburn (1934) foram empregadas para os coeficientes individuais das fases líquida e gasosa, respectivamente (Equações 2 e 3).

$$k_{L,i} = 0.92\left(\frac{a_p}{a_{gl}}\right)^{1/3}(Re_L)^{1/3}(Sc_{L,i})^{0,5}(Gr_L)^{1/6}\left(\frac{D_{L,i}}{d_p}\right) \quad (2)$$

$$h_{gl} = k_f\left(C_{PL}M_L\left[\frac{Sc_L}{Pr_L}\right]^{2/3}\right) \quad (3)$$

Essas equações fornecem predições mais precisas, até mesmo quando comparadas com correlações mais complexas e são amplamente utilizadas na literatura, como apontado por Oko *et al*., (2017) e Kuman e Mahulikar (2017).

Validação da Simulação

A validação das simulações foi conduzida com base na comparação entre os dados experimentais e os de simulação do estudo de Madeddu, Errico e Baratti (2018), que descreve uma coluna de absorção de leito empacotado operando com solução aquosa de MEA a 30% em peso. As condições das correntes de entrada e os parâmetros de dimensionamento da coluna empregados na validação estão apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2. Características das correntes de entrada

Corrente	Gás Rico em CO_2	Amina (MEA)
Temperatura (K)	288,15	292,15
Fluxo molar (mol/s)	0,14	1,04
CO_2 (fração molar)	0,191	0
MEA (fração molar)	0	0,055
H_2O (fração molar)	0,1	0,945
N_2 (fração molar)	0,709	0
Pressão (kPa)	103,15	103,15

Fonte: Madeddu, Errico e Baratti (2018).

Tabela 3. Parâmetros de dimensionamento da coluna

Parâmetro	Valor
Altura do recheio empacotado (m)	6,55
Diâmetro da coluna (m)	0,1
Tipo de recheio	Selas de Berl, 12,7 mm
Fração de vazios (m^3/m^3)	0,62
Área específica seca (m^2/m^3)	465

Fonte: Madeddu, Errico e Baratti (2018).

Os parâmetros das Tabelas 2 e 3 devem ser adicionados na seção "Column Internals" que contém detalhes acerca do projeto da coluna.

O percentual de remoção de CO_2 (R_{CO_2}) foi calculado conforme a Equação 4:

$$R_{CO_2}(\%) = \left(\frac{[CO_2]_{Entrada} - [CO_2]_{Saída}}{[CO_2]_{Entrada}}\right) \times 100 \qquad (4)$$

Análise de Sensibilidade: Parâmetros de Projeto

A partir do modelo validado, foram realizadas simulações sistemáticas para avaliar a influência dos parâmetros de projeto sobre a eficiência de remoção de CO_2. As variáveis e seus respectivos intervalos de análise estão descritos na Tabela 4. Para cada simulação, apenas o parâmetro de interesse foi alterado, mantendo-se constantes as demais condições da validação.

Tabela 4. Variáveis utilizadas na simulação e seus respectivos valores adotados.

Variável	Valores/Tipos Utilizados
Altura do recheio (m)	4,5, 5,55, 6,55 e 7,0
N° de estágios	50, 70 e 90
Tipo de recheio	Mellapak 250Y, Berl, Raschig, Pall e Intalox

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados das simulações da coluna de absorção de recheio para captura de CO_2. Primeiramente, a validação da simulação e os desvios entre dados experimentais e simulados serão discutidos. Depois, a investigação da influência da altura de recheio, do número de estágios e do tipo de recheio serão apresentados e analisados.

Validação Experimental do Modelo

A validação do modelo foi realizada comparando os resultados simulados com os dados experimentais de Madeddu, Errico e Baratti (2018). O perfil de temperatura da fase líquida ao longo da coluna, evidenciado pela Figura 3, obtido para 30 e 90 estágios, apresentou comportamento coerente com os dados experimentais, com desvio médio calculado em torno de 0,5%. Observou-se sobreposição dos perfis para os dois números de estágios, indicando que variações nessa discretização têm efeito desprezível no perfil térmico da coluna, visto que a diferença encontrada não é significativa, sendo necessário um incremento considerável na altura da coluna ou na vazão de MEA. Consequentemente, isso implicaria aumento tanto nos custos de capital quanto nos custos operacionais em uma planta em escala industrial (Sønderby *et al*., 2013).

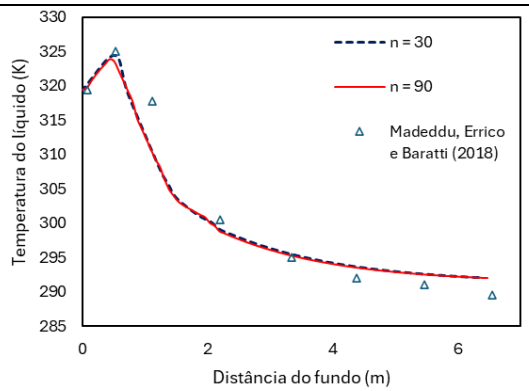


Figura 3. Perfil de temperatura ao longo da coluna de absorção para diferentes números de estágios.

Em relação à eficiência de remoção, os resultados simulados são apresentados na Tabela 5. Para 30 estágios, a simulação predisse 95,01% de remoção, enquanto para 90 estágios o valor foi de 95,61%, ambos com desvio inferior a 5% em relação ao dado experimental de referência (100%). Esses valores são consistentes com o relatado por Sønderby *et al.* (2013), que verificaram desvios similares para modelos baseados em taxas aplicados a colunas piloto de captura de CO_2 com MEA. A boa aderência dos resultados confirma a robustez do modelo *rate-based* com o pacote ELECNRTL para predições operacionais do sistema e evidencia que a simulação está validada.

Tabela 5. Validação a partir da remoção de CO_2 utilizando-se 30 e 90 estágios.

N° de estágios	Fração Molar Entrada	Fração Molar Saída	Remoção (%)
30	0,19100	0,00954	95,01%
90	0,19100	0,00839	95,61%

Análise de Sensibilidade

a) Efeito da Altura de Recheio

A avaliação do efeito da altura do leito empacotado sobre a remoção de CO_2 foi conduzida para quatro valores: 4,5, 5,55, 6,55 e 7,0 m. Os resultados, apresentados na Figura 4, evidenciam que a composição final de CO_2 diminui progressivamente com o aumento da altura, ao considerar que a corrente gasosa flui do fundo para o topo da coluna. Assim, as linhas ao se aproximarem do eixo horizontal a composição final é próxima a zero. Dessa forma, esse aumento promove ganhos cada vez mais decrescentes, o que resulta em custos por vezes desnecessários.

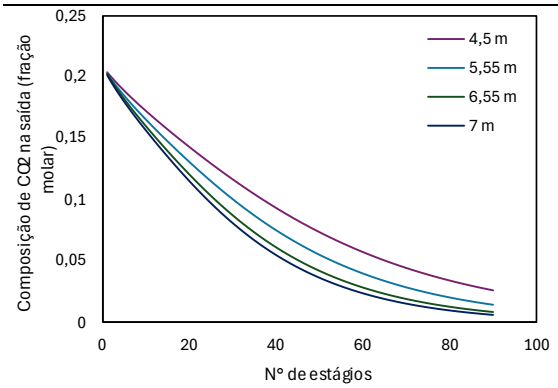


Figura 4. Perfil de concentração de CO_2 ao longo da coluna de absorção para diferentes alturas.

Assim, ao visualizar a Figura 4, as alturas de 6,55 m e 7,0 m proporcionaram o eixo horizontal mais perto do zero, garantindo remoções de 95,61% e 96,58%, respectivamente, representando um ganho incremental de apenas 0,97 pontos percentuais para um aumento de 0,45 m de recheio. Esse comportamento é explicado pela redução da força motriz de transferência de massa nos estágios superiores da coluna: à medida que o gás é empobrecido em CO_2, a diferença de concentração entre as fases diminui, tornando a captura progressivamente mais lenta. Como observado por Thiels *et al.* (2016), os ganhos de remoção diminuem expressivamente à medida que se aproxima da faixa de 90–99% de captura, sendo necessárias alturas proporcionalmente maiores para pequenas melhorias adicionais. Procopio *et al.* (2023) encontraram resultado análogo, identificando 7,0 m como altura ideal para remoção de 99% de CO_2 com MEA a 20% em peso e recheio Mellapak 500Y. Dessa forma, a altura de 7,0 m foi adotada como referência nas simulações subsequentes, por representar o melhor compromisso entre eficiência e custo de capital.

b) Efeito do Número de Estágios

Posteriormente, foi analisada a influência do número de estágios na discretização da coluna sobre a remoção de CO_2 para 50, 70 e 90 estágios, mantendo-se a altura de 7,0 m. Os resultados, apresentados na Tabela 6, demonstram que as três configurações produzem eficiências muito próximas, na faixa de 96,37–96,58%.

Tabela 6. Análise de sensibilidade do número de estágios na remoção de CO_2.

N° de estágios	Fração Molar Final de CO_2	Remoção (%)
50	0,006940125	96,37
70	0,006675720	96,50
90	0,006530121	96,58

A diferença entre 50 e 90 estágios é de apenas 0,21 pontos percentuais de remoção, resultado que demonstra a convergência numérica do modelo e indica que o refinamento da malha axial não agrega benefícios expressivos ao processo. Além disso, estágios adicionais refletem maior esforço computacional e tempo de convergência. Do ponto de vista de projeto, 50 estágios mostram-se suficientes para descrever adequadamente o sistema, com menor custo computacional e, em unidades reais, correspondendo a uma coluna mais compacta e de menor queda de pressão, conforme reportado por Chu *et al.* (2016). Esse fenômeno ocorre porque a concentração de CO_2 torna-se muito baixa nos estágios superiores, reduzindo a força motriz e tornando a transferência de massa praticamente negligenciável a partir de determinado ponto.

c) Efeito do Tipo de Recheio

Mantendo-se a altura de 7,0 m e 50 estágios, a avaliação do tipo de recheio foi realizada comparando um recheio estruturado (Mellapak 250Y) com quatro recheios randômicos (anéis de Raschig, selas de Berl, anéis de Pall e selas Intalox). Os resultados de composição final de CO_2 ao longo da coluna são obtidos apresentados na Figura 5. Nela, pode-se perceber que à medida que se distancia do topo da coluna menor a composição do CO_2. Além disso, as linhas que representam os recheios informam de que forma a remoção está acontecendo ao longo da coluna. Quanto mais inclinada em direção ao eixo horizontal, mais eficientemente a remoção acontece para uma dada altura de coluna.

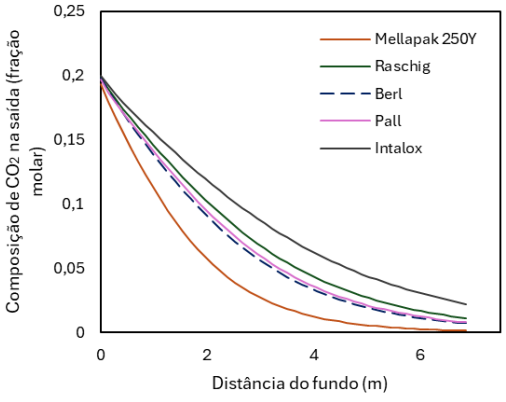


Figura 5. Perfil de concentração de CO_2 ao longo da coluna de absorção para diferentes recheios.

O recheio estruturado Mellapak 250Y destacou-se de forma expressiva ao capturar boa parte do CO_2 antes da metade da coluna. Em termos de remoção, atingiu-se 99,35%, correspondendo a aproximadamente 3 pontos percentuais acima do melhor recheio randômico avaliado (Berl). Esse desempenho superior

está associado à maior área específica efetiva e à melhor distribuição do líquido proporcionadas pelos recheios estruturados, que aumentam o coeficiente volumétrico de transferência de massa e reduzem a altura de unidade de transferência (HTU) para uma mesma remoção de CO_2, como demonstrado por Valenz *et al.* (2011). Além disso, recheios estruturados promovem menor queda de pressão em comparação com recheios randômicos, o que favorece a operação do absorvedor sem incremento nos custos energéticos (Bruschi, 2021).

Entre os recheios randômicos, as selas de Berl (96,37%) apresentaram o melhor desempenho, seguidas pelas selas Intalox (95,75%), anéis de Pall (94,99%) e anéis de Raschig (94,23%). Segundo Dinca *et al.* (2015), as selas de Berl possuem maior área de superfície efetiva em relação aos anéis de Raschig e Pall, o que favorece o contato entre as fases e melhora a eficiência de transferência de massa. Os anéis de Raschig, por serem o modelo mais antigo e geometricamente simples, apresentam menor área específica e maior queda de pressão, justificando seu pior desempenho relativo. Os resultados obtidos corroboram os de Kothandaraman *et al.* (2009), que verificaram aumento da carga rica e redução do fluxo de solvente necessário ao utilizar recheios com maior área superficial em absorvedores de CO_2 com MEA.

CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a influência dos parâmetros de projeto, altura de recheio, número de estágios e tipo de recheio, sobre a eficiência de uma coluna absorvedora para captura de CO_2 com MEA, mediante simulações no Aspen Plus® com modelo *rate-based* e pacote termodinâmico ELECNRTL. O modelo foi validado com dados experimentais da literatura, apresentando desvios inferiores a 5% tanto no perfil de temperatura da fase líquida quanto no percentual de remoção de CO_2, o que confirma sua adequação para predições operacionais do sistema.

A análise de sensibilidade dos parâmetros de projeto permitiu identificar as seguintes condições ideais: (i) altura de recheio de 7,0 m, que proporciona remoção de 96,58% e representa o melhor compromisso entre eficiência e custo de capital; (ii) 50 estágios de discretização, suficientes para atingir praticamente a mesma eficiência que 70 ou 90 estágios, com menor complexidade e custo de projeto; e (iii) recheio estruturado Mellapak 250Y, que se destacou com 99,35% de remoção, superando os melhores recheios randômicos (selas de Berl com 96,37% e anéis de Raschig com 94,23%) graças à sua maior área específica efetiva e melhor distribuição do líquido.

Os resultados demonstram que a escolha do tipo de recheio é o parâmetro de projeto com maior impacto na eficiência de captura, sendo a substituição de recheios randômicos por estruturados capaz de promover ganhos expressivos de desempenho sem necessidade de aumento das dimensões físicas da coluna. A simulação computacional comprovou-se uma ferramenta eficaz e viável para o dimensionamento adequado de sistemas de absorção de CO_2. Dessa forma, algumas das desvantagens sobre a MEA citadas anteriormente poderão ser compensadas, amenizando os impactos causados e contribuindo ainda mais para a mitigação dos efeitos causados pelas emissões de CO_2 na atmosfera.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se: (i) estender a análise às condições operacionais (vazão e concentração de MEA) de forma integrada com os parâmetros de projeto aqui determinados; (ii) simular o ciclo completo de captura incluindo a coluna de regeneração (*stripper*) para avaliação energética global do processo; (iii) investigar o desempenho de outros solventes (DEA, MDEA, PZ e misturas) e de geometrias alternativas de coluna (leito rotativo, coluna compacta); e (iv) realizar análise tecno-econômica das configurações identificadas como ideais neste estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCMAT) e à Universidade Federal de Sergipe (UFS) pela assistência técnica e pelo suporte fornecidos ao longo desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

AHMAD, R. Vapor Liquid Equilibrium (VLE) in H2O-Amine-CO2 system. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2012.

BALOGH, J. M.; MIZIK, T. Global impacts of climate policy and trade agreements on greenhouse gas emissions. Agriculture, v. 13, n. 2, p. 424, 2023.

BRUSCHI, L. T. Avaliação comparativa do projeto de torre de absorção química para captura de gases ácidos de gás natural com diferentes tipos de recheio e de captura de CO2 de gases de combustão. 2021. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2021.

BORHANI, T. N; NABAVI, S. A; HANAK, D. P; MANOVIC, P. Thermodynamic models applied to CO2 absorption modelling. Reviews in Chemical Engineering, v. 37, n. 8, p. 931-957, 2021.

CHAO, C.; DENG, Y.; DEWIL, R.; BAEYENS, J.; FAN, X. Post-combustion carbon capture. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 138, p. 110490, 2021.

CHEN, Chau-Chyun; SONG, Y. Generalized electrolyte-NRTL model for mixed-solvent electrolyte systems. AIChE Journal, v. 50, n. 8, p. 1928-1941, 2004.

CHILTON, T. H.; COLBURN, A. P. Mass transfer (absorption) coefficients prediction from data on heat transfer and fluid friction. Industrial & Engineering Chemistry, v. 26, n. 11, p. 1183-1187, 1934.

CHU, F.; YANG, L.; DU, X.; YANG, Y. CO2 capture using MEA (monoethanolamine) aqueous solution in coal-fired power plants: Modeling and optimization of the absorbing columns. Energy, v. 109, p. 495-505, 2016.

DINCA, C.; BADEA, A.; STOICA, L.; PASCU, A. Absorber design for the improvement of the efficiency of post-combustion CO2 capture. Journal of the Energy Institute, v. 88, n. 3, p. 304-313, 2015.

GARCIA, M.; KNUUTILA, H. K.; GU, S. ASPEN PLUS simulation model for CO_2 removal with MEA: Validation of desorption model with experimental data. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 5, p. 4693–4701, 2017. DOI: 10.1016/j.jece.2017.08.024.

GEANKOPLIS, J. C. Transport Processes and Unit Operations. 3 ed. University of Minnesota: Prentice-Hall Internacional, 1993. 905 p. (livro)

HESSEN, E. T.; HAUG-WARBERG, T.; SVENDSEN, H. F. The refined e-NRTL model applied to CO2–H2O–alkanolamine systems. Chemical Engineering Science, v. 65, n. 11, p. 3638– 3648, 2010.

KIANI, A.; JIANG, K.; FERON, P. Techno-economic assessment for CO2 capture from air using a conventional liquid-based absorption process. Frontiers in Energy Research, v. 8, p. 92, 2020.

KORONAKI, I. P.; PRENTZA, L.; PAPAEFTHIMIOU, V. Modeling of CO2 capture via chemical absorption processes: An extensive literature review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 50, p. 547-566, 2015.

KOTHANDARAMAN, A.; NORD, L.; BOLLAND, O.; HERZOG, H. J.; McRAE, G. J. Comparison of solvents for post-combustion capture of CO2 by chemical absorption. Energy Procedia, v. 1, p. 1373-1380, 2009.

LIU, Y.; ZHANG, L.; WATANASIRI, S. Representing vapor−liquid equilibrium for an aqueous MEA−CO2 system using the electrolyte nonrandom two-liquid model. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 38, n. 5, p. 2080-2090, 1999. DOI: 10.1021/ie980600v. Disponível https://doi.org/10.1021/ie980600v.

MADEDDU, C.; ERRICO, M.; BARATTI, R. CO2 Capture by Reactive Absorption-Stripping: Modeling, Analysis and Design. Springer, 2018.

MAJNOON, A.; HAJINEZHAD, A.; MOOSAVIAN, S. F. Simulation model of carbon capture with MEA and the effect of temperature and duty on efficiency. Future Energy, v. 3, n. 2, p. 37–47, maio 2024. DOI: 10.55670/fpll.fuen.3.2.5

MIKHAYLOV, A.; MOISEEV, N.; ALESHIN, K.; BURKHARDT, T. Global climate change and greenhouse effect. Entrepreneurship and Sustainability Issues, v. 7, n. 4, p. 2897-2913, 2020.

MOIOLI, S.; NAGY, T.; LANGÉ, S.; PELLEGRINI, L. A.; MIZSEY, P. Simulation model evaluation of CO2 capture by aqueous MEA scrubbing for heat requirement analyses. Energy Procedia, v. 114, p. 1558-1566, 2017.

PROCOPIO, M. N.; URQUIZA, G.; CASTRO, L.; ZEZATTI, V. Saturation of the MEA solution with CO2: Absorption prototype and experimental technique. Results in Engineering, v. 19, p. 101286, 2023.

RENON, H.; PRAUSNITZ, J. M. Local compositions in thermodynamic excess functions for liquid mixtures. AIChE journal, v. 14, n. 1, p. 135-144, 1968.

ROLIM, I. S. Análise da viabilidade técnico-econômica de captura de dióxido de carbono por absorção química. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

SØNDERBY, T. L.; CARLSEN, K. B.; FOSBØL, P. L.; KIØRBOE, L. G.; SOLMS, N. A new pilot absorber for CO2 capture from flue gases: Measuring and modelling capture with MEA solution. International Journal of Greenhouse Gas Control, v. 12, p. 181-192, 2013.

SINNOTT, R.; TOWLER, G. Chemical engineering design: SI Edition. Butterworth Heinemann, 2019.

THIELS, M.; WONG, D. S. H.; YU, C. H.; KANG, J. L.; JANG, S. S. Modelling and design of carbon dioxide absorption in rotating packed bed and packed column. IFAC-PapersOnLine, v. 49, n. 7, p. 895-900, 2016.

TUNG, H.; MAH, R. S. Modeling liquid mass transfer in HIGEE separation process. Chemical Engineering Communications, v. 39, n. 1-6, p. 147-153, 1985.

OKO, E.; WANG, M.; RAMSHAW, C. Study of mass transfer correlations for intensified absorbers in post-combustion CO2 capture based on chemical absorption. Energy Procedia, v. 114, p. 1630-1636, 2017.

VALENZ, L.; REJI, F. J.; SIMA, J.; LINEK, V. Absorption mass-transfer characteristics of Mellapak packings series. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 50, n. 21, p. 12134-12142, 2011.

VEGA, F.; BAENA-MORENO, F. M.; FERNÁNDEZ, L. M. G.; PORTILLO, E.; NAVARRETE, B.; ZHANG, Z. Current status of CO2 chemical absorption research applied to CCS: Towards full deployment at industrial scale. Applied Energy, v. 260, p. 114313, 2020.

WANG, N.; WANG, D.; KROOK-RIEKKOLA, A.; JI, X. MEA-based CO2 capture: a study focuses on MEA concentrations and process parameters. Frontiers in Energy Research, v. 11, p. 1230743, 2023.

XU, Q. Thermodynamics of CO2 Loaded Aqueous Amines. 2011. Doctoral Dissertation – The University of Texas at Austin, Austin, 2011.

ZHANG, Y.; CHEN, C. Modeling CO2 absorption and desorption by aqueous monoethanolamine solution with Aspen rate-based model. Energy Procedia, v. 37, p. 1584-1596, 2013.