



SIMULAÇÃO DINÂMICA E CONTROLE DE UM PROCESSO DE ABSORÇÃO DE SO₂ EM H₂O USANDO O SOFTWARE AVEVA PROCESS SIMULATION

PAULO H. N. FERREIRA^{1*}, CARLOS A. M. DA SILVA¹, MILENE C. CODOLO¹

¹Universidade Federal de São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Departamento de Engenharia Química
*e-mail: phnferreira@unifesp.br

RESUMO - Os poluentes gasosos são nocivos à saúde e ao meio ambiente, dessa forma precisam ser removidos de forma adequada e eficiente. Dentre os poluentes gasosos, é possível destacar o dióxido de enxofre (SO₂). Esse poluente é proveniente principalmente da queima de combustíveis fósseis para produção de energia. Dentro desse contexto, é importante avaliar os processos de remoção do dióxido de enxofre dos gases de combustão tornando tais processos mais eficientes e com menor custo. Neste trabalho, investigou-se a influência das condições operacionais de uma torre de recheio na eficiência de remoção de SO₂ de uma corrente gasosa, usando como base uma torre de nebulização real desenvolvida por Codolo (2010). Para isso, a torre de recheio foi implementada no simulador *AVEVA Process Simulation*. O tipo de recheio e o número de pratos da torre foram modificados para 9 diferentes condições experimentais de modo a obter a capacidade de remoção de SO₂ da torre de nebulização de Codolo (2010). As respostas dinâmicas da concentração de SO₂ na saída da torre em função de distúrbios nas variáveis de entrada foram obtidos. Um controlador PID foi implementado e mostrou robustez para o controle do tipo servo e regulatório, alcançando desvios menores que 2%.

INTRODUÇÃO

A rápida expansão industrial, o crescimento populacional e estilos de vida cada vez mais urbanizados, vem gerando aumento das emissões de gases poluentes na atmosfera. Segundo Wang *et al.* (2004) a poluição do ar atmosférico é definida pela presença na atmosfera de um ou mais contaminantes sob forma de poeira, gases, névoa, odor, fumaça e vapor, que em função de suas características, quantidade e duração de exposição, podem causar prejuízos ao ser humano e ao meio ambiente.

O órgão NAAQS (*National Ambient Air Quality Standards*) formulou critérios de controle de qualidade do ar para proteger a saúde e o bem-estar de toda vida terrestre. Os critérios foram estabelecidos com base nos principais poluentes do ar: material particulado, monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃),

dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂) e Chumbo (Pb) (SCHNELLE; BROWN, 2002).

A fonte majoritária de emissão antropogênica de SO₂ é proveniente da queima do carvão, 24% do petróleo, 15% dos processos industriais e 3% da queima de biomassa. Altas concentrações de dióxido de enxofre prejudicam as vegetações, uma vez que causam lesões nas folhas quando expostas a esse contaminante. Além disso, o SO₂ pode ser oxidado para SO₃, que por sua vez reage com a água suspensa na atmosfera, formando ácido sulfúrico. Esse ácido precipita afetando o bioma e o ecossistema, diminuindo a fertilidade do solo e contaminando lagos e rios, inclusive, gerando consequências econômicas por causar danos a edifícios, estruturas e patrimônios históricos (LIKENS; BORMANN, 1974).

Os impactos do SO₂ para a saúde humana também são preocupantes. A exposição a níveis

elevados de concentrações de SO₂ podem levar ao aumento das taxas de mortalidade, devido ao aumento dos riscos de doenças cardiorrespiratórias (MEDLEY *et al.*, 2002).

Portanto, torna-se cada vez mais necessário encontrar formas eficientes para tratamento dos gases poluentes atrelados ao desenvolvimento de processos economicamente viáveis na geração de energia limpa que contribuam para o desenvolvimento sustentável.

Diversos equipamentos são utilizados para controle de poluição. Os principais equipamentos para remoção de componentes de gases poluentes são conhecidos como absorvedores ou lavadores. O principal fenômeno físico que rege o processo de remoção nesses equipamentos é a absorção que se dá pela transferência de massa de um componente da fase gasosa para a fase líquida. Para absorção, o constituinte da fase gasosa precisa ser solúvel no líquido e pode ser removido por seu valor econômico, como etapa de preparação de algum composto ou por problemas de poluição do ar. Os equipamentos mais utilizados no processo de absorção são: torres de recheio, torres de pratos e torre de nebulização (CHEREMISINOFF, 2002).

De acordo com Keshavarz *et al.* (2008), as torres de nebulização possuem vantagens como o projeto simples e baixa queda de pressão e por isso são comumente utilizados para uma ampla variedade de aplicações na indústria, como: resfriamento e umidificação de gases, purificação gasosa e remoção de partículas. É possível obter alta eficiência para remoção de SO₂ utilizando colunas de nebulização. Entretanto, trata-se de um processo extremamente complexo por possuir diversas variáveis que influenciam na taxa de transferência de massa, como: pH da solução, vazão de líquido e gás, altura e diâmetro da coluna, tipos de bicos atomizadores, área interfacial de gotas, formação do filme líquido na parede da torre. (CODOLO; BIZZO, 2013; WANG *et al.* 2015; CODOLO; BIZZO, 2016; TURPIN *et al.*, 2008; ARANI *et al.* 2020;). O estudo da influência das variáveis envolvidas no processo de remoção de gases poluentes em torre de nebulização pode ser facilitado pelo uso de ferramentas computacionais como os simuladores de processos.

A simulação de processos tem o objetivo de prever como um sistema se comportaria sob um determinado conjunto de condições operacionais, sendo muito importante para a otimização e controle de processos sem a necessidade de procedimentos experimentais.

O *AVEVA Process Simulation* é uma ferramenta inovadora que integra o projeto, a simulação dinâmica, o treinamento, a otimização e o controle em um único software e vem mostrando grande potencial em estudos no ramo da engenharia química, sendo ideal para atender a todo o ciclo de vida de uma planta industrial (BEER; DEPEW, 2021).

A aplicação de controladores em plantas industriais, sobretudo controle do tipo *feedback*, são importantes para manter as condições de operação do processo em valores desejáveis de forma automatizada (ELYAS; FOO, 2017).

Na literatura, ainda são escassos estudos relacionados à simulação dinâmica e controle de processos utilizando um software de última geração para prever o processo de remoção de SO₂ em coluna de nebulização. No estudo de Pouladi *et al.* (2016) foi utilizado o ASPEN-HYSYS para simular uma torre de absorção para o processo (em escala comercial) de remoção de CO₂ proveniente da combustão de etano utilizando dietanolamina (DEA) como absorvente. Harun, *et al.* (2012) estudaram a dinâmica do processo de absorção utilizando como absorvente a monoetanolamina (MEA) para remoção de CO₂ proveniente de gases de combustão gerados em plantas de potências. Zhaofeng *et al.* (2013) realizaram a simulação dinâmica para estudar o comportamento da absorção e dessabsorção de CO₂ de gases de combustão utilizando o software DYNsim. Attarakhiha *et al.* (2013) implementaram controle em um processo de absorção de CO₂ em água utilizando uma coluna de pratos. Ahmed (2016), por meio de simulação e controle, analisou o comportamento dinâmico de uma torre de recheio para remoção de CO₂ utilizando uma solução de NaOH como absorvente.

O objetivo do presente trabalho foi realizar simulações em estado estacionário e dinâmico do processo de absorção de uma corrente gasosa contendo SO₂ em coluna recheada com características de transferência

de massa aproximadas a uma coluna de absorção por nebulização real desenvolvida por Codolo (2010), a fim de analisar o comportamento da remoção do SO_2 de uma corrente gasosa utilizando água pura como absorvente.

MÉTODOS

Sistema Experimental

O presente trabalho utilizou os dados do trabalho experimental desenvolvido por Codolo (2010) em sua tese de doutorado. Seu estudo consistiu na avaliação experimental do processo de remoção de SO_2 utilizando uma solução diluída de NaOH em uma torre de nebulização operando em contracorrente com recirculação.

A torre possuía altura efetiva de 1,5 m e diâmetro interno de 0,29 m. Na parte inferior da torre haviam duas entradas de gás que passavam por uma câmara de distribuição contendo 18 orifícios de 25 mm de diâmetro cada. Na parte superior da torre, existiam duas saídas, por onde o gás seguia para a chaminé, para dispersar o SO_2 ainda existente após a passagem do gás pela torre. Uma placa de orifício acoplado a um manômetro de coluna de líquido foi utilizada para medição do fluxo de gás. O líquido foi pulverizado na torre por bicos pulverizadores de pressão tipo cone cheio com ângulo de abertura de 15° e, para não coincidir com a saída do gás, os bicos foram dispostos a 240 mm do topo e 180 mm abaixo do centro de saída do gás. A pressão de pulverização do líquido foi medida com um manômetro e a vazão com um rotâmetro. As concentrações de SO_2 foram monitoradas usando um analisador infravermelho contínuo HORIBA (ENDA-1000) com sistema de manuseio de amostras. A amostra de gás passava pelo sistema de manuseio de amostras que consiste em um separador, coletor, filtro de partículas e desumidificador. A fase líquida consistia em uma solução diluída de NaOH em água injetada por bomba peristáltica diretamente na tubulação que seguia para os bicos, a solução do tanque era bombeada utilizando uma bomba centrífuga do tanque de solução aos bicos pulverizadores. O fluxograma do processo considerado é mostrado na Figura 1, em que: (1) ventilador, (2) cilindro de SO_2 , (3) medidor

do fluxo de SO_2 , (4) medidor da temperatura do gás, (5) placa de orifício, (6) entrada de gás, (7) tanque de solução, (8) bomba centrífuga, (9) medidor de fluxo de solução, (10) medidor de pressão, (11) torre de nebulização, (12) bocais, (13) analisador de gás, (14) saída de gás, (15) reservatório de solução (NaOH), (16) bomba peristáltica, (17) medidor de temperatura da solução, (18) válvula de drenagem.

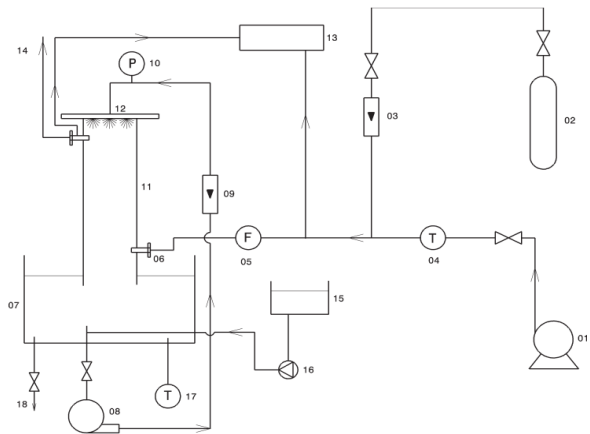


Figura 1: Fluxograma do processo de absorção de SO_2 em torre de nebulização.

Codolo (2010) variou as vazões do gás e do líquido, combinando com duas configurações diferentes de bicos pulverizadores (5 bicos e 1 bico). Para cada condição operacional, a concentração de SO_2 na saída e entrada da torre foi medida para o cálculo da eficiência. Foi estudado a influência da velocidade superficial do gás e a relação L/G na eficiência de remoção de SO_2 para cada configuração de bicos.

Os testes foram realizados variando as vazões de ar para cada vazão de líquido. Além disso, cada vazão de gás foi testada com um conjunto de 5 bicos e com apenas 1 bico. A concentração de SO_2 na entrada da torre ($C_{\text{SO}_2,E}$) foi mantida constante em 900 ppm. A torre operou em temperatura de 30°C e pressão atmosférica (1 atm).

Implementação do Modelo no AVEVA Process Simulation.

Em se tratando de simulações de processos usando simuladores modulares e orientado a equações, o modelo de uma torre de nebulização é de difícil aplicação, uma vez que, até o momento, não há algoritmos matemáticos acoplados a um simulador modular conhecido,

que leve em consideração a complexa hidrodinâmica envolvida nesse processo. Em geral, para estudos aprofundados, são utilizados modelos em fluidodinâmica computacional (CFD). Por esta razão, muitos estudos para analisar o comportamento de absorção em torres de nebulização são fundamentalmente experimentais, com o objetivo de estudar a influência das condições operacionais na eficiência de remoção e na determinação do coeficiente de transferência de massa médio.

Por outro lado, para torres de recheio, diversos simuladores modulares estacionários e dinâmicos possuem modelos bem definidos. Diante disso, foi realizado o estudo do comportamento dinâmico de uma torre de recheio utilizando como parâmetros de entrada os dados experimentais da torre de nebulização estudada por Codolo (2010).

Os dados experimentais de Codolo (2010) são provenientes de um sistema SO_2/NaOH em que ocorre absorção com reação química irreversível e instantânea (PINILLA *et al.*, 1984). A solução de NaOH não é saturada de maneira instantânea e por isso o líquido de absorção é reciclado através da torre. Neste trabalho, para um estudo preliminar, foi considerada a absorção de SO_2 em água pura. Nesse caso, a taxa de reação de hidrólise do dióxido de enxofre em água é rápida em relação ao processo de difusão, a superfície do filme de água é instantaneamente saturada na concentração de equilíbrio (MEIKAP *et al.*, 2002). Por isso, a recirculação do líquido de absorção não foi necessária.

Primeiramente, a torre de recheio foi implementada no *AVEVA Process Simulation*. A capacidade interna de transferência de massa, que é dada pelo coeficiente de transferência de massa médio, deve ter valores aproximados entre a torre de recheio e a torre de nebulização de Codolo (2010), para cada condição de operação. O comportamento de remoção de SO_2 na torre foi analisado ao acompanhar a resposta da variável controlada $C_{\text{SO}_2,S}$ (concentração de SO_2 na saída da torre) efetuando variações das variáveis de distúrbio: vazão de gás de entrada $[G_1]$ e $C_{\text{SO}_2,E}$. Foi utilizada como variável manipulada a vazão de líquido na entrada $[L_1]$. A Figura 2 mostra o fluxograma das etapas efetuadas.

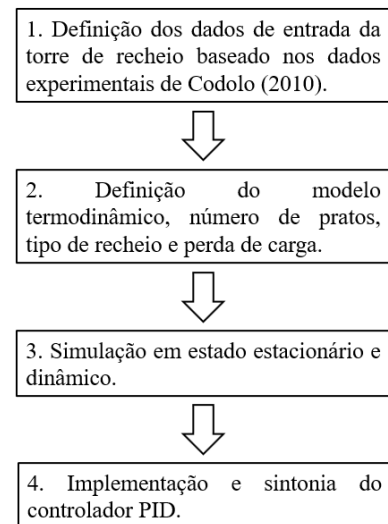


Figura 2: fluxograma das etapas realizadas.

Para a determinação do modelo termodinâmico, foram considerados os dados experimentais de solubilidade de SO_2 em água avaliados na temperatura do processo de $30\text{ }^\circ\text{C}$ (GREEN, D. W.; SOUTHARD, M. Z., 2019) e devido à baixa concentração de SO_2 utilizada (900 ppm), o sistema é considerado diluído. A Figura 3 mostra um comportamento fortemente linear entre os dados de solubilidade, evidenciando que a solução tem comportamento aproximadamente ideal, ou seja, o soluto obedece a lei de *Henry* e o solvente obedece a lei de *Raoult*.

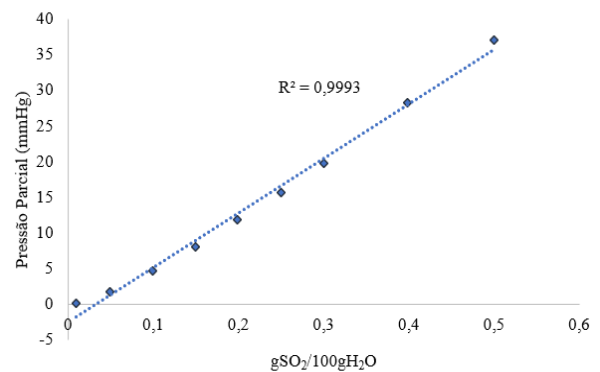


Figura 3: Solubilidade de SO_2 em água.

A construção da torre de recheio no simulador envolveu a definição do número de estágios de equilíbrio equivalentes a uma torre de pratos (N_E). Utilizando uma etapa prévia da simulação em estado estacionário, foi possível efetuar uma estimativa inicial do número de estágios teóricos ao avaliar o perfil de eficiência em função do número de estágios como mostrado na Figura 4.

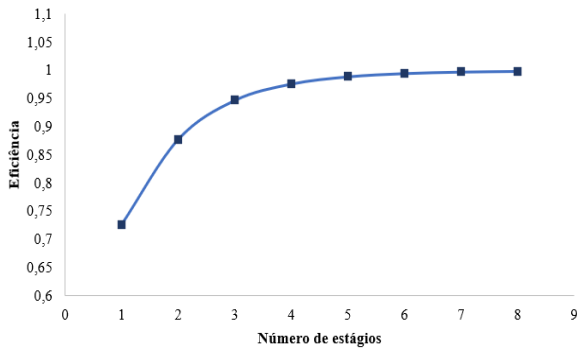


Figura 4: Perfil de eficiência da torre em função do número de estágios.

A perda de carga da torre foi estimada utilizando a correlação gráfica de Eckert (1961) de acordo com a Figura 5.

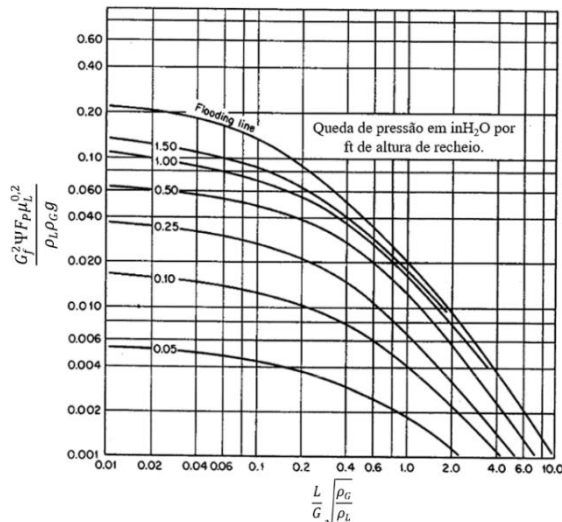


Figura 5: Correlação de inundação e queda de pressão de Eckert (1961).

O dióxido de enxofre é um gás altamente solúvel em água, em função disso, o sistema possui um expressivo valor de constante de Henry, resultando que a maior parte da resistência à transferência de massa reside na fase gasosa. Consequentemente, a fase gasosa controla o processo de transferência de massa. Portanto, o coeficiente de transferência de massa individual pode ser aproximado ao coeficiente de transferência de massa global da fase gasosa. Sendo assim, o coeficiente volumétrico de transferência de massa $K_g a$ pode ser estimado tomando como base a média logarítmica das diferenças de concentração ao longo da torre, como expresso na Equação 1.

$$K_g a = \frac{G_1}{RTh_t A_t} \ln \left(\frac{C_{SO_2,E}}{C_{SO_2,S}} \right) \quad (1)$$

A eficiência de remoção de SO_2 (η) da torre de recheio simulada foi calculada de acordo com a Equação 2.

$$\eta = \frac{C_{SO_2,E} - C_{SO_2,S}}{C_{SO_2,E}} \quad (2)$$

Neste trabalho, foram considerado os dados de vazão de líquido e gás utilizados para a configuração da torre com 5 bicos atomizadores de 2,4 mm de diâmetro obtidos por Codolo (2010). Os valores de $K_g a$ utilizados foram obtidos por Codolo e Bizzo (2013). As condições operacionais da torre são expressas na Tabela 2.

Tabela 2: Condições operacionais da torre.

Condição	$K_g a$ (kmol/s.m ³ .Pa)	L_1 (L/h)	G_1 (m ³ /h)
1	4,50E-07	800	95,1
2	6,75E-07	800	142,7
3	8,50E-07	800	190,2
4	2,60E-07	1000	95,1
5	3,40E-07	1000	142,7
6	4,25E-07	1000	190,2
7	1,90E-07	1500	95,1
8	2,00E-07	1500	142,7
9	2,50E-07	1500	190,2

Definidas as condições iniciais, bem como o modelo termodinâmico, o número de estágios e a perda de carga ao longo da coluna. Foi possível implementar a torre de recheio no *AVEVA Process Simulation* respeitando as restrições de eficiência de contato gás-líquido (E_c) do simulador (entre 0 e 1) e a faixa recomendada (entre 50 e 80%) para o fator de inundação (F) de acordo com Theodore (2008). O fluxograma do processo no *AVEVA* é mostrado na Figura 6.

Um controle PID foi implementado utilizando um sensor de concentração na corrente do gás de saída da torre a fim de medir a concentração de SO_2 (variável controlada). O método de sintonia heurístico foi utilizado para o ajuste dos parâmetros do controlador: ganho proporcional (K_P), constante de tempo integral

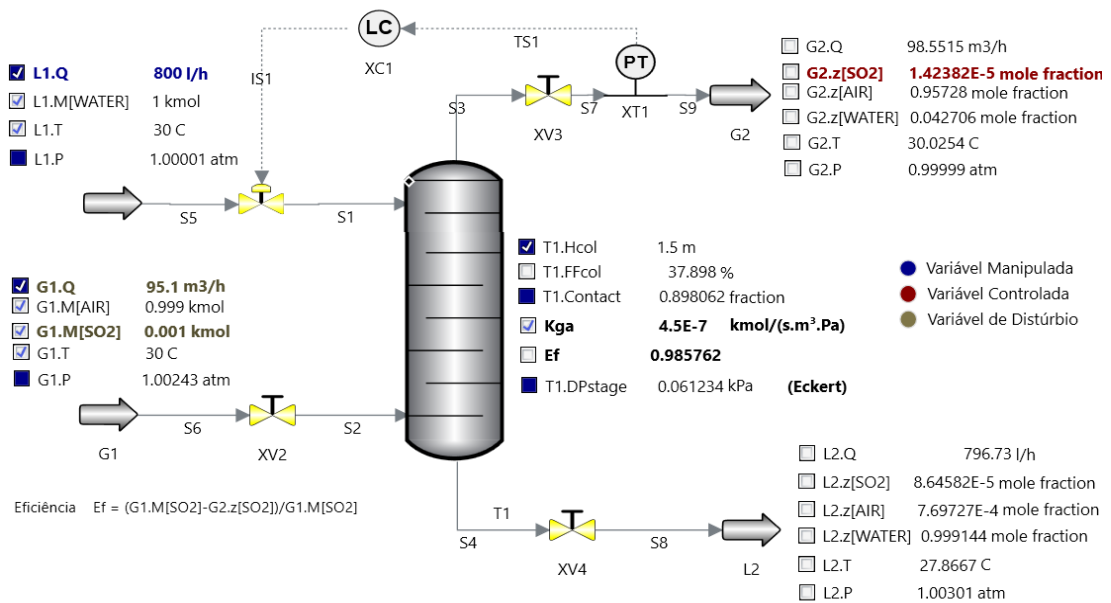


Figura 6: Fluxograma do processo no AVEVA Process Simulation.

(τ_i) e constante de tempo derivativo (τ_D). Os parâmetros foram ajustados até que a resposta da variável controlada atingisse o menor tempo de estabilização e *overshoot* possíveis. O resultado da sintonia para o problema do tipo servo foram: $K_P = 15800$, $\tau_i = 42$ s e $\tau_D = 5$ s. Já para o problema do tipo regulatório, os parâmetros obtidos foram: $K_P = 2000000$, $\tau_i = 50$ s e $\tau_D = 15$ s.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulação em Estado Estacionário

Primeiramente, para construção da torre de recheio no simulador, avaliou-se o aumento percentual da eficiência ao alterar o número de estágios em equilíbrio equivalentes a uma torre de pratos, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3: Aumento percentual da eficiência.

Número de Estágios	η	$\Delta\eta(\%)$
1	0,727	-
2	0,878	17,226
3	0,947	7,325
4	0,976	2,983
5	0,989	1,302
6	0,995	0,586

Foi possível observar que o aumento percentual de eficiência após o quinto estágio foi de aproximadamente 1% em relação a eficiência máxima.

Por outro lado, o aumento percentual de eficiência entre a utilização de apenas um e cinco estágios foi de 26,55%. Portanto, a fim de otimizar o processo de remoção de SO₂ na torre simulada, considerou-se cinco estágios iniciais.

A adaptação das capacidades de transferência de massa entre a torre de recheio simulada e a torre de nebulização experimental foi efetuada variando o tipo de recheio da torre de modo a obter o valor do coeficiente de transferência de massa experimental obtido por Codolo (2010), mantendo o fator de inundação e eficiência de contato gás-líquido dentro das restrições já especificadas. A eficiência da torre também foi calculada. A Tabela 4 mostra os resultados obtidos e expressaram a configuração necessária de uma torre de recheio de modo que tenha a capacidade de transferência de massa de uma torre de nebulização. Com esses parâmetros foi possível estudar o comportamento dinâmico da torre de recheio implementada no simulador AVEVA Process Simulation. Observa-se o comportamento da eficiência de remoção da torre para cada mudança de condição experimental.

Nos testes realizados para vazão de líquido de 800 L/h obteve-se os maiores valores de eficiência. O aumento da vazão de gás ocasionou o aumento da eficiência de contato gás-líquido E_C requerido acima de 100% para a configuração com 5 estágios. Com isso, variou-se o número de estágios de modo a manter o valor de E_C dentro das restrições.

Tabela 4: Resultados obtidos na simulação para cada condição operacional.

Condição	Tipo de recheio	F(%)	E _c (%)	η(%)	N _E
1	Raschig rings 10 (482 m ² /m ³ - Ceramic)	76,28%	89,81%	98,58%	5
2	Raschig rings 15 (314 m ² /m ³ - Ceramic)	74,98%	88,27%	98,60%	8
3	Raschig rings 15 (264 m ² /m ³ - Ceramic)	75,91%	96,28%	98,20%	11
4	Berl Saddles 15 (300 m ² /m ³ - Ceramic)	76,19%	56,24%	91,43%	5
5	Raschig Rings 12 (416 m ² /m ³ - Metal)	65,74%	59,52%	88,25%	5
6	Raschig rings 15 (264 m ² /m ³ - Ceramic)	78,47%	66,28%	86,57%	5
7	Raschig Rings 12 (416 m ² /m ³ - Metal)	50,82%	48,43%	90,58%	5
8	Raschig Rings 15 (317 m ² /m ³ - Metal)	55,09%	38,43%	79,28%	5
9	Raschig Rings 15 (317 m ² /m ³ - Metal)	73,35%	32,55%	69,30%	5

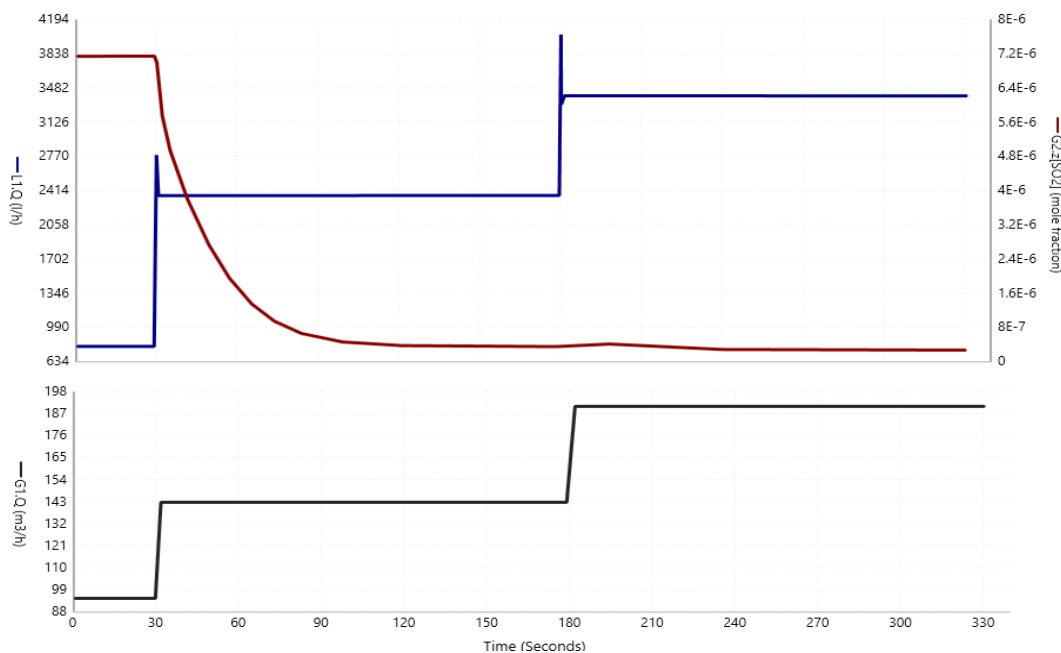
Na condição de vazão de líquido de 1000 L/h e 1500 L/h observou-se a diminuição da eficiência com o aumento da vazão de gás. Esse comportamento era esperado, uma vez que para uma vazão fixa de líquido, o aumento do volume de gás a ser tratado diminui a capacidade de remoção da torre.

Simulação Dinâmica

A simulação dinâmica em malha aberta foi efetuada primeiramente realizando distúrbios na forma degrau em G₁, conforme mostrado na Figura 7. O primeiro distúrbio em que G₁ variou de 95,1 m³/h para 142,7 m³/h em t = 30 s ocasionou um aumento na vazão de líquido de entrada de 800 l/h para 2361,97 l/h gerando uma diminuição acentuada na concentração de SO₂ na saída.

No segundo degrau, em t = 180 s o degrau em G₁ foi de 142,7 m³/h para 190,2 m³/h, a vazão de líquido aumentou para 3391,86 l/h, entretanto, a concentração de SO₂ na saída da torre teve uma diminuição inexpressiva. Isso indica que o simulador ajustou a vazão de líquido de modo a obter a maior remoção de SO₂ possível logo no primeiro distúrbio, alcançando um valor de eficiência próximo ao limite de 100%.

Em seguida, foram efetuados distúrbios na concentração de SO₂ na entrada da torre, mantendo-se a vazão de gás de entrada constante. A Figura 8 mostra o comportamento da variável manipulada L₁ e da variável controlada C_{SO₂,S} em função de distúrbios efetuados na concentração de SO₂ de entrada C_{SO₂,E}.

Figura 7: Resposta de L₁ e C_{SO₂,S} em função de distúrbios em G₁.

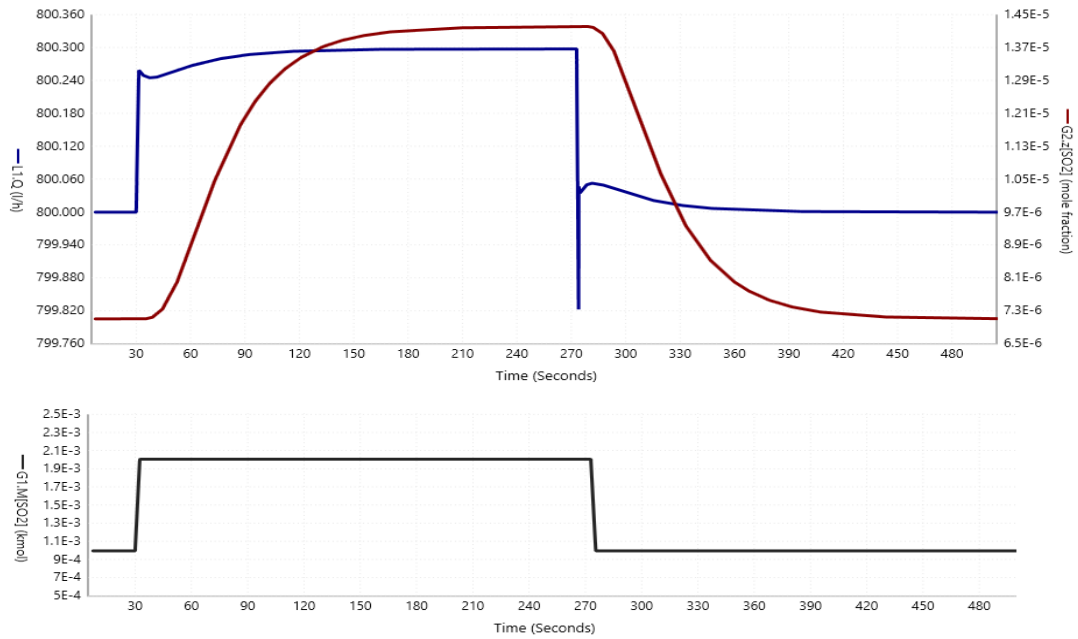


Figura 8: Resposta de L_1 e $C_{SO_2,S}$ em função dos distúrbios em $C_{SO_2,E}$.

De acordo com a Figura 8, é possível observar dois distúrbios na concentração de SO_2 na entrada da torre. O primeiro distúrbio sob a forma de degrau foi efetuado em $t = 30$ s com magnitude de +100 ppm. Com isso, houve um aumento esperado da concentração de SO_2 na saída da torre, uma vez que as vazões de líquido e gás foram mantidas constantes. O segundo distúrbio de forma degrau foi efetuado no tempo $t = 270$ s de magnitude -100 ppm. Como resposta, a concentração de SO_2 na saída da torre diminuiu até o patamar inicial. A vazão de líquido na entrada se manteve praticamente constante.

Controle do Processo

No problema de controle do tipo servo, tem-se o comportamento da variável controlada e da variável manipulada L_1 em decorrência de mudanças no valor desejado, conforme mostrado na Figura 11. Em todas as mudanças efetuadas do valor desejado, a variável controlada não demonstrou *overshoot*. Em relação à velocidade de estabilização, tem-se que o controlador conseguiu ajustar a variável controlada ao seu novo estado estacionário com tempo de 150 s para os degraus de +1 ppm e 200 s para o degrau de -2 ppm.

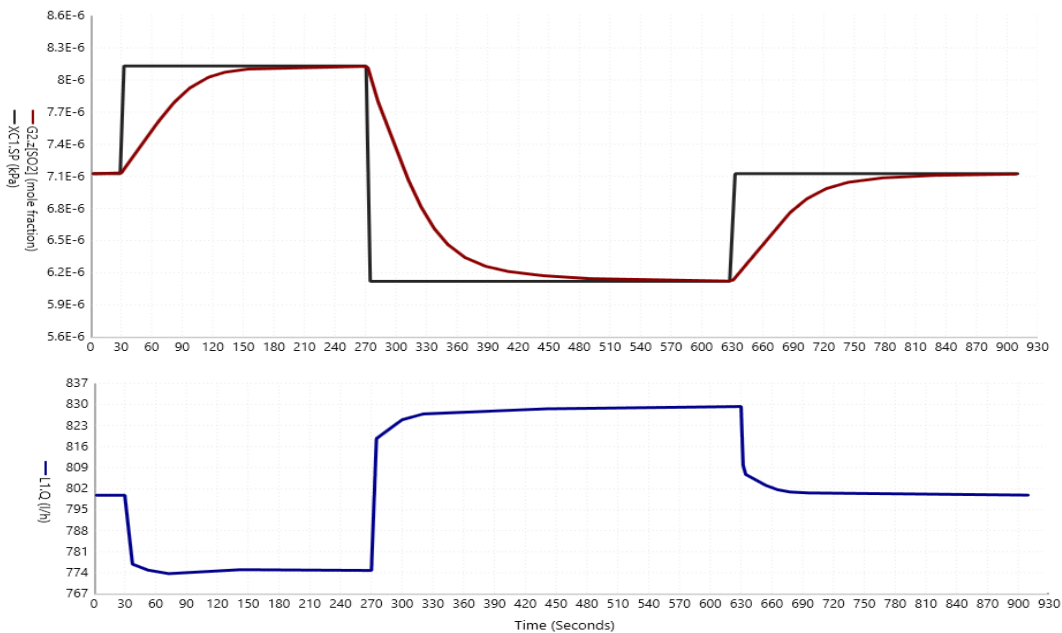


Figura 11: Resposta de $C_{SO_2,S}$ e L_1 em função das mudanças de *set-point*.

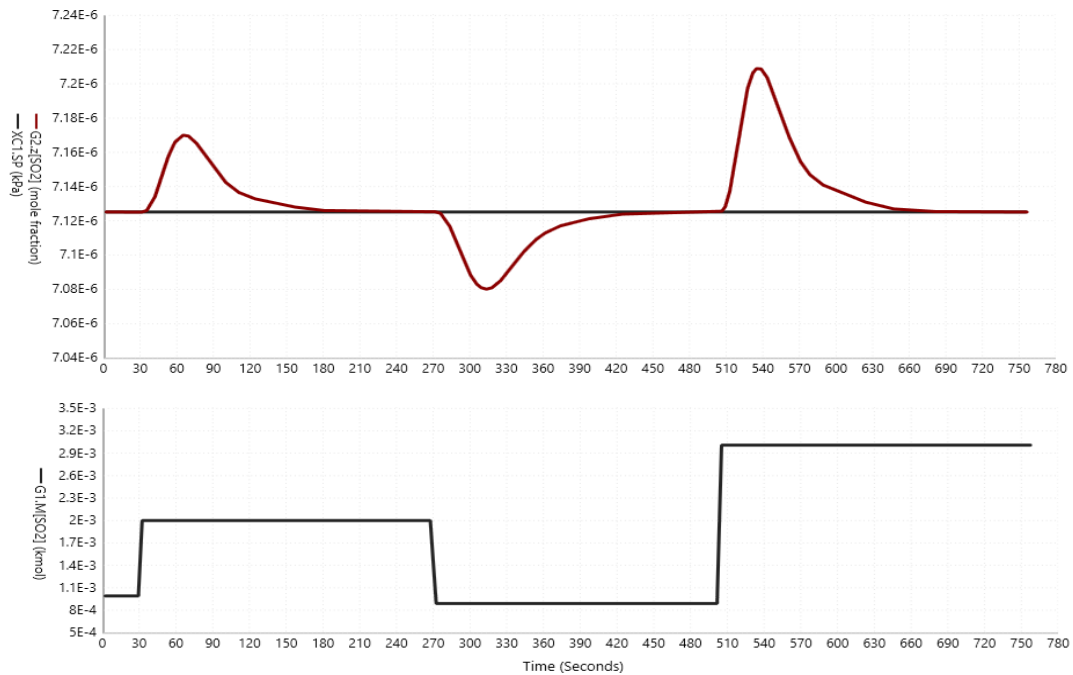


Figura 12: Resposta de $C_{SO_2,S}$ em função de distúrbios em G_1 .

No problema do tipo regulatório, observa-se o comportamento da variável controlada em função de distúrbios efetuados em G_1 como mostrado na Figura 12. Foram efetuados distúrbios sob a forma de degrau com magnitude de +100 ppm em $t = 30$ s, -100 ppm em $t = 270$ s e +200 ppm em $t = 500$ s. O controlador conseguiu manter a variável controlada no seu valor desejado com erros menores que 2%. O tempo de estabilização para cada degrau foi menor que 180 s.

CONCLUSÃO

Os objetivos principais do presente trabalho foram alcançados. Efetuou-se estudos em estado estacionário e dinâmico de uma torre de recheio com características de transferência de massa comparáveis a de uma torre de nebulização. Em estado estacionário, realizou-se o estudo do perfil de eficiência em função do número de estágios para uma condição inicial.

O número de estágios foi definido baseando-se no valor que maximiza a eficiência do processo, tomando em consideração as restrições de fator de inundação e eficiência de contato. Variando-se o tipo de recheio, obteve-se as configurações da torre de recheio a ser simulada para cada condição experimental da torre de nebulização de Codolo (2010), contornando as limitações

da complexidade hidrodinâmica envolvida no processo de absorção em torres de nebulização. A partir das condições iniciais da torre de recheio, avaliou-se o comportamento da concentração de SO_2 na saída da torre em decorrência de distúrbios na vazão de gás. Nessa etapa, a vazão de líquido aumentou de forma acentuada com o objetivo de maximizar a remoção de SO_2 de entrada. A segunda análise, avaliou-se o comportamento da concentração de SO_2 em função de distúrbios efetuados na concentração de SO_2 na entrada. A vazão de líquido e gás mantiveram-se constante. O comportamento da concentração de SO_2 na saída teve tendência esperada, aumentou para distúrbios positivo e diminuiu para distúrbios negativos na concentração de saída.

Finalmente, foi implementado um controlador PID no processo para manter os valores de SO_2 no valor desejado. A sintonia foi efetuada de forma heurística. Foi possível obter um controlador capaz de controlar a eficiência do sistema. No problema do tipo servo, o sistema de controle conseguiu alcançar o novo valor de *set-point* com nenhum *overshoot* e com tempo de estabilização menor que 150 s para cada distúrbio sucessivo. No problema do tipo regulatório, obteve-se erro menor que 2% mesmo para o maior distúrbio de +200 ppm na concentração de entrada da torre. O sistema

voltou para o regime permanente de forma rápida, com tempo de estabilização menor que 180 s por distúrbio efetuado.

O estudo mostrou um grande potencial e viabilidade da utilização do *AVEVA Process Simulation* para simular e controlar um sistema com dinâmica complexa como a torre de nebulização, apenas realizando adaptações na capacidade de remoção para uma torre de recheio e utilizando os dados experimentais como entrada sem a necessidade da obtenção do modelo matemático do processo. Este estudo é parte preliminar de um estudo maior sobre o processo de absorção utilizando soluções aquosas iônicas.

NOMENCLATURA

A_t [m ²]	Área da seção transversal da torre.
$C_{SO_2,E}$ [kmol/m ³]	Concentração de SO ₂ na entrada da torre.
$C_{SO_2,S}$ [kmol/m ³]	Concentração de SO ₂ na saída da torre.
E_c [%]	Eficiência de contato.
F [%]	Fator de inundação.
G_1 [m ³ /h]	Vazão da corrente gasosa de entrada da torre.
h_t [m]	Altura da torre.
$\bar{K}_g a$ [kmol/s m ³ Pa]	Coefficiente volumétrico de transferência de massa médio.
L_1 [l/h]	Vazão da corrente líquida de entrada da torre.
R [m ³ Pa/K kmol]	Constante universal dos gases.
T [K]	Temperatura.
η [%]	Eficiência da torre.

REFERÊNCIAS

- AHMED D. F.; AHMED S. A. (2016), The dynamic behavior and control of absorption column. *Tikrit J. Eng. Sci.*, vol 35, n. 2, p.1-11.
- ARANI, M. A.; HATAMIPOUR, M. S.; RAHIMI, A. (2020), Kinetic Study of Reactive SO₂ Absorption in a Jet Bubbling Reactor: Experimental Determination of Mass Transfer Coefficients and Absorption Rate, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol 59, p.8984-8994.
- ATTARAKIHA M.; ABU-KHADER, M.; BART, H. J. (2013), Dynamic analysis and control of sieve tray gas absorption column using MATLAB and SIMULINK, *Appl. Soft Comput.*, vol 13, p. 1152-1169.
- BEER, J.; DEPEW, C. (2021), The role of process engineering in the digital transformation. *Comput. Chem. Eng.*, vol 154, n. 1, p.1-7.
- CHEREMISINOFF, N. P. (2002) *Handbook of chemical processing equipment*. 1st ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 535 p.
- CODOLO, M. C.; BIZZO, W. A. (2013), Experimental study of the SO₂ removal efficiency and volumetric mass transfer coefficients in a pilot-scale multi-nozzle spray tower, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol 66, p.80-89.
- CODOLO, M. C. (2010), Avaliação experimental da absorção de SO₂ e estudo preliminar da absorção de NO em torre de nebulização. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 141p. (Doutorado em Engenharia Mecânica).
- HARUN, N.; NITTAYA, T. DOUGLAS, P. L.; CROISET, E. RICARDEZ-SANDOVAL L. A. (2012), Dynamic simulation of MEA absorption process for CO₂ capture from power plants, *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol 10, p.295-309.
- ELYAS, R.; FOO, D. C. Y. (2017), Basics of process simulation. *In: GERAGHTY, F. Chemical Engineering Process Simulation*. Amsterdam: Elsevier. cap. 1, p.3-21.
- LIKENS, G. E.; BORMANN, F. H. (1974), Acid rain: a serious regional environmental problem, *Science*, vol 184, n. 4142, p.1176-1179.

- MEIKAP, B. C.; KUNDU, G.; BISWAS, M. N. (2002), Modeling of a novel multi-stage bubble column scrubber for flue gas desulfurization. *Chemical Engineering Journal*, vol 86, p.331-342.
- PINILLA, E. A., DÍAZ, J. M., COCA, J. (1984), Mass transfer and axial dispersion in a spray tower for gas-liquid contacting. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v.62, pp. 617-622.
- POULADI, B.; HASSANKIADEHB, M. N.; BEHROOZSHAD, F. (2016), Dynamic simulation and optimization of an industrial-scale absorption tower for CO₂ capturing from ethane gas, *Energy Reports*, vol 2, p.54-61.
- SCHNELLE, B. K.; BROWN, C. A. (2002), *Air pollution control technology handbook*. Boca Raton: CRC Press., 405 p.
- SMITH, J. S.; PITCHER, H.; WIGLEY, T. M. L. (2001), Global and regional anthropogenic sulfur dioxide emissions. *Glob. PlanetChange*, vol 29, n. 2, p.99-119.
- SMITH S. J.; VAN AARDENNE, J.; KLIMONT, Z.; ANDRES, R. J.; VOLKE, A.; DELGADO ARIAS, S. (2011), Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* vol 10, n. 1, p.16111–16151
- SOUTHARD, M. Z.; GREEN, D. W. (2019), *Perry's chemical engineers' handbook*. 9th ed., New York, McGraw-Hill Book Co., 2274 p.
- THEODORE, L.; RICCI, F. (2010), *Mass Transfer Operations for the Practicing Engineer*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 630 p
- TURPIN, A.; COUVERT, A.; LAPLANCHE, A.; PAILLIER, A. (2008), Experimental study of mass transfer and H₂S removal efficiency in a spray tower, *Chem. Eng. and Process.*, vol 47, p.886-892.
- WANG, K. L.; PEREIRA, C. N.; HUNG Y. T. (2004), *Air pollution control engineering*. 1st ed. New Jersey: Human Press Inc, 504 p.
- ZHAOFENG, X.; JIN, B; ZHONG, Z. (2013), Dynamic simulation of post-combustion capture system, *Energy Procedia.*, vol 37, p.2164-2171.