

USO DO SIMULADOR EMSO EM AULAS DE OPERAÇÕES UNITÁRIAS PARA PROJETO DE TROCADORES DE CALOR E EVAPORADORES

Rodolfo Rodrigues

*Laboratório de Engenharia de Processos Assistida por Computador (LEPAC),
Departamento de Engenharia Química – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM – RS,
rodolfo.rodrigues@ufsm.br*

Resumo – Os simuladores de processos são ferramentas computacionais importantes para projeto de equipamentos e processos. Por isso mesmo, o uso dessas ferramentas no ensino de Operações Unitárias se torna importante. Este trabalho avalia a experiência de uso do simulador EMSO em aulas de Operações Unitárias no curso de Engenharia Química da UFSM durante o segundo semestre letivo de 2021. Duas atividades foram propostas envolvendo o projeto de trocadores de calor de geometrias diversas e de evaporadores de efeitos simples e múltiplos. A partir da linguagem de modelagem do EMSO, os grupos implementaram o cálculo da área de troca térmica desses equipamentos. Os modelos foram simulados e comparados satisfatoriamente com a literatura. Nenhum dos estudantes teve contato com o EMSO anteriormente e, mesmo com um pequeno tempo de treinamento, conseguiram desenvolver as atividades de modo bastante satisfatório. Os estudantes também consideraram que as atividades propostas no EMSO foram um bom modo de abordar os conteúdos usando *softwares* além da maioria considerar que as atividades conseguiram promover um melhor entendimento dos temas desenvolvidos em aula.

Palavras-chave: EMSO. Trocador de calor. Evaporador. Operações unitárias. Ensino e aprendizagem.

Introdução

O conceito de Operações Unitárias é um dos pilares da formação de profissionais da Engenharia Química e, por isso mesmo, o seu ensino e aprendizado é importantíssimo. As Operações Unitárias são geralmente abordadas em componentes curriculares de conteúdo específico de cursos de graduação em Engenharia Química a partir da segunda metade do curso. Tradicionalmente os objetivos dessas disciplinas são a análise e o projeto de equipamentos com as mais diversas aplicações na indústria. Estes objetivos exigem o conhecimento e aplicação de conceitos, sobretudo, de Fenômenos de Transporte e Termodinâmica resultando, muitas vezes, em um conjunto de equações algébricas a serem solucionadas. Os problemas deste tipo também podem envolver a manipulação algébrica de equações e a obtenção de dados graficamente a partir de diagramas ou interpolados de tabelas de propriedades. Além do que, problemas mais complexos podem resultar em um sistema grande de equações que pode ser de resolução trabalhosa sem o uso de ferramentas computacionais.

As principais ferramentas computacionais usadas na análise e projeto de equipamentos são os simuladores de processos. Dentre os simuladores de processos disponíveis comercialmente podem-se citar os *softwares* das companhias AspenTech, AVEVA, Chemstations, Honeywell e Siemens. Há também simuladores de processos de uso livre para fins acadêmicos (ou mesmo para fins comerciais) onde o Brasil é destaque com DWSIM, EMSO e iiSE. EMSO [1] (acrônimo para *Environment for Modeling, Simulation and Optimization*) é um simulador de processos orientado a equações e, por isso, bastante flexível para a modelagem fenomenológica de equipamentos e processos industriais. A Fig. 1 ilustra a interface integrada para desenvolvimento e simulação de modelos e visualização de resultados. Há entre 150 e 200 trabalhos [2] que utilizaram o EMSO em pesquisas acadêmicas e aplicações industriais contudo, há poucos trabalhos [3–6] que utilizaram o mesmo em aplicações educacionais para ensino e aprendizagem de Engenharia Química. Rodrigues; Soares; Secchi [3] apresentaram e discutiram problemas típicos do currículo de Engenharia Química implementados no EMSO. Os autores salientaram a versatilidade do EMSO ao unir características de simuladores de processos e de ferramentas matemáticas. Rodrigues; Soares; Secchi [4] retrataram o uso educacional do

EMSO no ensino de Engenharia das Reações Químicas. Os autores ressaltaram a linguagem de modelagem estruturada do EMSO que permite uma implementação mais organizada comparada a outras ferramentas computacionais. Ospino; Sánchez; Secchi [5] apresentaram uma biblioteca de modelos no EMSO para uso educacional em Controle de Processos como alternativa ao Simulink (MathWorks, Inc.) e Xcos (Scilab Team; ESI Group). Os autores destacaram a avaliação positiva dos estudantes que experimentaram os modelos em relação a utilidade, simplicidade e praticidade do EMSO em comparação ao Simulink. Por fim, Henrique *et al.* [6] retrataram o uso educacional do EMSO aplicado a Otimização de Processos. Os autores apontaram a versatilidade do EMSO na resolução dos problemas de otimização mais simples aos mais complexos.

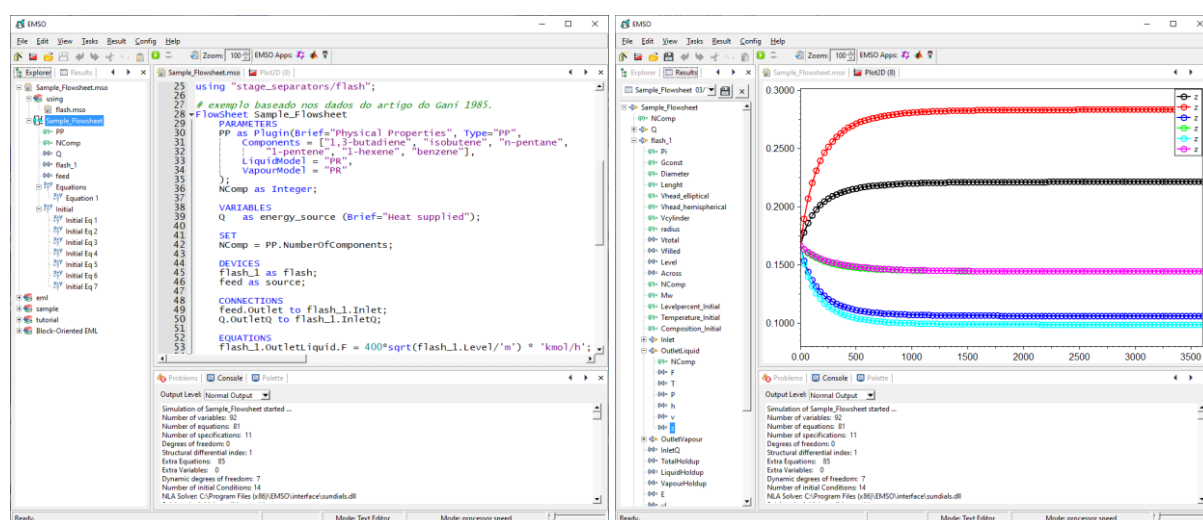


Figura 1 – Na esquerda, a interface de modelagem e simulação do simulador EMSO. Na direita, a interface para visualização de resultados.

O uso de simuladores de processo em aulas de Operações Unitárias já era algo desejado pelos próprios estudantes da instituição conforme levantamento de diretrizes para reforma curricular do curso [7]. As diretrizes também apontaram que o domínio de ferramentas computacionais na prática de profissionais de Engenharia Química é considerado imprescindível. Neste contexto, este trabalho visa expor e avaliar a experiência de uso do simulador EMSO, durante o segundo semestre letivo de 2021 e sob condições de ensino remoto, no componente curricular de “Operações Unitárias com Transferência de Calor e Massa I” do curso de graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). A disciplina está localizada no sexto semestre da matriz curricular, possui uma carga horária de 60 h e sua ementa inclui o estudo de trocadores de calor, geradores de vapor, evaporadores e cristalizadores [8].

Metodologia

Durante o segundo semestre letivo de 2021 do componente curricular de “Operações Unitárias com Transferência de Calor e Massa I” da UFSM foram propostas duas atividades assíncronas utilizando o simulador EMSO. Essas atividades foram desenvolvidas por uma turma de 25 estudantes divididos em cinco grupos de cinco integrantes cada. Os grupos tiveram um prazo de 30 dias para desenvolver cada atividade.

Os assuntos escolhidos foram: (1) projeto de trocadores de calor de geometrias diversas a partir dos métodos da MLDT (média logarítmica das diferenças de temperatura) e ε -NUT (efetividade-número de unidades de transferência); e (2) projeto de evaporadores de efeitos

simples e múltiplos considerando ou não a EPE (elevação do ponto de ebulição) e o calor de solução. As atividades consistiam basicamente na implementação do conjunto de equações para projeto dos equipamentos diretamente no simulador EMSO a partir de sua linguagem de modelagem. A linguagem de modelagem do EMSO é próxima da linguagem escrita e, por isso, mais simples para criação de modelos comparada a outras linguagens usadas para o mesmo objetivo como, por exemplo, MATLAB Scripting (MathWorks, Inc.) e Python (Python Software Foundation). Após, os modelos foram simulados para condições de operação definidas na literatura para fins de comparação das respostas.

Para as duas atividades foram fornecidos arquivos iniciais chamados de “exemplos mínimos”. Assim, os grupos de estudante não precisaram iniciar as atividades de um arquivo em branco. Era esperado que os estudantes não tivessem conhecimento prévio do EMSO e de sua linguagem de modelagem deste modo, os exemplos mínimos continham um conjunto de variáveis e equações essenciais para o início de cada projeto. As principais características e funções do EMSO e os exemplos mínimos foram explicados em cerca de 1,5 h durante aulas síncronas e assíncronas para que todos os estudantes tivessem um conhecimento básico de como interpretar os modelos e, principalmente, de como adicionar novas variáveis e equações. Explicações detalhadas do uso e características do EMSO e de sua linguagem de modelagem não são fornecidas neste trabalho, mas podem ser consultadas em [4, 9]. Em torno de 3 h de atendimentos síncronos e assíncronos aos estudantes foram realizados para esclarecimento de dúvidas pontuais da implementação das atividades no EMSO.

Cada atividade foi subdividida em cinco outros subprojetos, de modo que cada grupo tivesse atividades distintas para desenvolver no simulador EMSO. Deste modo, o projeto de trocadores de calor pelos métodos MLDT e ε -NUT incluía as seguintes configurações:

1. escoamentos paralelo e contracorrente;
2. casco-tubos de um passe no casco e dois passes nos tubos;
3. casco-tubos de dois passes no casco e quatro passes nos tubos;
4. escoamento cruzado com ambos fluidos não misturados;
5. escoamento cruzado com um fluido misturado e o outro não misturado.

Cada projeto dos trocadores de calor deveria ser validado com a comparação com um ou mais exemplos de livros-texto ou exercícios desenvolvidos em aula. Esses exemplos eram de livre escolha dos grupos. Para o método MLDT de geometrias complexas (casco-tubos e escoamento cruzado), em que é necessário determinar um fator de correção da MLDT a partir de diagramas, foi indicado o trabalho de [10]. Neste trabalho são fornecidas equações algébricas para determinar diretamente os fatores de correção da MLDT ao invés de utilizar um método gráfico (que é geralmente indicado nos livros-texto). Os projetos desenvolvidos no simulador EMSO também deveriam abranger um número mínimo de variáveis: temperaturas de entrada e saída, vazões mássica, calores específicos e capacidades caloríficas (médias) dos fluidos quente e frio, média logarítmica das diferenças de temperatura, taxa, coeficiente global, efetividade, número de unidades e área de transferência de calor. A Fig. 2 ilustra geometrias comuns de trocadores de calor dentre os geralmente estudados nos livros-texto.

Para o projeto de evaporadores foram propostos subprojetos a partir de exemplos específicos de livros-texto [13–15], de modo que novamente cada grupo tivesse atividades distintas para desenvolver:

1. evaporador de efeito simples para concentrar suco de laranja conforme Exemplo 10.2 [13]. EPE é dada pela Eq. de Crapiste-Lozano [16];
2. evaporador de efeito simples para concentrar solução aquosa de NaOH conforme Exemplo 8.4-3 [14]. EPE é dada pela Eq. 16 [17], e calor de solução pela Eq. 4 [18];

3. evaporador de efeito duplo, em contracorrente, para concentrar solução aquosa de sólidos orgânicos dissolvidos conforme Exemplo 19.2 [15];
4. evaporador de efeito triplo para concentrar solução aquosa de açúcar conforme Exemplo 8.5-1 [14]. EPE e calor de solução são dados por expressões algébricas disponíveis no próprio exemplo;
5. evaporador de efeito triplo para concentrar solução aquosa de NaOH conforme Exemplo 19.3 [15]. EPE é dada pela Eq. 16 [17], e calor de solução pela Eq. 4 [18].

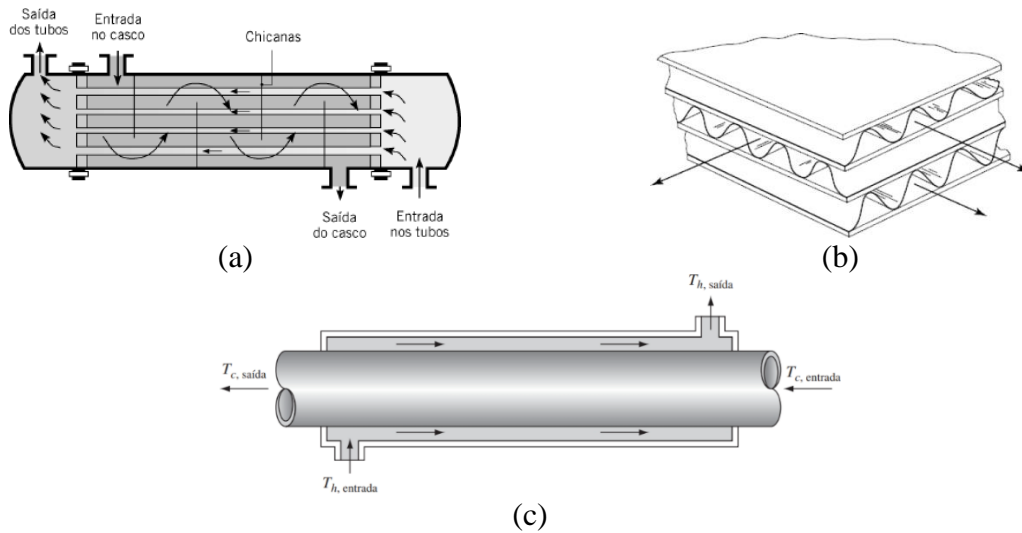


Figura 2 – Trocadores de calor: (a) casco-tubo com um passe no casco e um passe nos tubos [11], (b) de placas com escoamento cruzado de fluidos não misturados [11] e (c) bitubular de escoamento contracorrente [12].

Os cinco projetos de evaporadores acima possuíam todo o desenvolvimento de cálculo disponível nas referências [13–15] de modo que os valores obtidos no EMSO poderiam ser comparados com a literatura original. Os projetos de evaporadores também deveriam abranger um número mínimo de variáveis que eram: vazões mássicas, composições, temperaturas, pressões e entalpias das correntes de líquido e vapor, economia de vapor, taxa, coeficiente global e área de transferência de calor. A Fig. 3 ilustra o Exemplo 8.5-1 [14] que considera um evaporador de efeito triplo, em cocorrente, indicando as variáveis envolvidas no problema de cálculo das áreas de troca térmica de cada efeito.

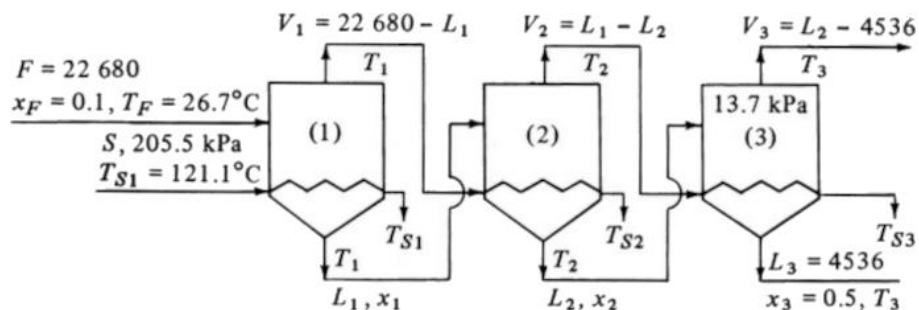


Figura 3 – Esquema de um evaporador de efeito triplo para concentrar uma solução aquosa de açúcar [14].

Todos os projetos foram avaliados quanto a qualidade dos códigos desenvolvidos, o atendimento ao número mínimo de variáveis requeridas, a comparação entre valores simulados e da literatura, e a justificativa da ocorrência de divergências entre esses valores (caso houvesse).

Em um terceiro momento, um questionário eletrônico foi enviado aos 25 estudantes para avaliar as suas percepções em relação as atividades propostas no EMSO. O questionário era constituído de 9 perguntas entre elas: sobre o uso do EMSO e outros simuladores de processos em aulas de Operações Unitárias, se as informações fornecidas inicialmente foram suficientes para desenvolver as atividades, sobre a dificuldade de cada projeto proposto e espaço para comentários, críticas e sugestões gerais. O questionário era de resposta anônima e não obrigatória.

Resultados e Discussão

O “exemplo mínimo” para o projeto de trocadores de calor está disponível *online* no GitHub¹ (arquivo: “trocador_de_calor.mso”). Este exemplo apresenta os balanços de energia para os fluidos quente e frio de um trocador de calor. O modelo (linhas 3–30) é constituído por 2 equações e 9 variáveis. Isto é, são necessárias especificar 7 variáveis para que o grau de liberdade seja 0 (zero). Na sequência (linhas 32–78) são apresentados dois exemplos de uso do modelo a partir de exemplos da literatura [19, 11]. Os resultados obtidos pelo EMSO foram idênticos aos da literatura.

A partir do “exemplo mínimo” de trocador de calor, os estudantes implementaram o cálculo da área de troca térmica a partir dos métodos MLDT e ε -NUT. Isto envolvia a adição, em média, de 11 variáveis e 10 equações novas. Os grupos chegaram exatamente a mesma área de troca térmica usando ambos os métodos, o que contrasta com o que é visto nos livros-texto. Por alternar etapas algébricas e gráficas, geralmente os livros-texto não obtêm os mesmos valores de área de troca térmica usando os dois métodos. Todos os cinco grupos desenvolveram as atividades de modo bastante satisfatório sendo que três grupos obtiveram a nota máxima. Dois grupos tiveram dificuldade para convergir a simulação devido a erros pontuais. Os erros são listados a seguir:

- variáveis usadas em equações, mas não declaradas;
- variáveis declaradas e não usadas em equações (ou especificadas);
- linhas de código não encerradas com ponto-e-vírgula;
- erros de digitação em equações, sobretudo em relação a parênteses, e
- *Model* e *FlowSheet* com os mesmos nomes.

O “exemplo mínimo” para o projeto de evaporadores está também disponível *online* no GitHub² (arquivo: “evaporador.mso”). Este arquivo é mais complexo que o “exemplo mínimo” do projeto de trocadores de calor pois explora melhor os recursos de composição e herança da linguagem de modelagem orientada a objetos do EMSO [9]. Este “exemplo mínimo” implementa um modelo genérico de evaporador (linhas 52–95) com balanços de massa e energia e outras relações além de definir duas entradas (correntes de alimentação e vapor de aquecimento) e três saídas (correntes de líquido concentrado, vapor produzido e líquido condensado) totalizando 28 variáveis e 21 equações. Isto é, para um evaporador de efeito simples são necessárias especificar 7 variáveis para que o grau de liberdade seja 0 (zero). As correntes de líquido (linhas 3–23) e vapor (linhas 26–49) foram implementadas em modelos a parte e utilizados no modelo principal (linhas 52–95) através dos recursos de composição e herança da linguagem de mode-

¹ https://github.com/rodolfo-enq/operacoes-unitarias/blob/main/trocador_de_calor.mso

² <https://github.com/rodolfo-enq/operacoes-unitarias/blob/main/evaporador.mso>

lagem. As propriedades pressão, entalpia e calor latente das correntes de líquido e vapor são calculadas por equações (linhas 19, 22, 42, 45 e 48) ajustadas a partir de dados da tabela de vapor do livro-texto [14]. A ideia, aqui, foi não utilizar o pacote de propriedades termodinâmicas do EMSO para tornar a implementação mais simples e, também, para tornar os resultados mais próximos de uma literatura conhecida dos estudantes. Na sequência (linhas 98–147) é apresentado um exemplo de uso do modelo a partir da implementação do Exemplo 8.5-1 [14] para um evaporador de efeito triplo contido, sem considerar os efeitos da EPE e do calor de solução. A implementação também exemplifica a criação de um processo a partir da conexão entre equipamentos. Este exemplo possui 64 variáveis e 55 equações necessitando, então, de 9 especificações para que o grau de liberdade seja 0 (zero). O *solver* [20] do EMSO se mostrou bastante sensível ao chute inicial de algumas variáveis. Isso fez com que a simulação não convergisse, por exemplo, quando o chute inicial para a área de troca térmica (linha 65) era 1 m². Este é o valor padrão (*Default*) para variáveis do tipo “*area*” definida no arquivo “*types.mso*” (linha 56 deste arquivo). Assim, a alteração deste valor padrão para 10 m² fez com que a simulação convergisse. Isso também foi observado para as temperaturas cujos os valores padrões foram definidos como 30 e 100 °C, respectivamente, para as correntes de líquido e vapor. A área de troca térmica obtida pelo EMSO diferiu em –5,98% em relação ao valor da literatura. Isso é bastante satisfatório uma vez que a literatura realiza um cálculo aproximado (e bastante trabalhoso) além de assumir os efeitos da EPE e calor de solução.

A partir do “exemplo mínimo” de evaporador, os estudantes implementaram o cálculo da área de troca térmica e economia de vapor para diferentes configurações. Isto envolvia, por exemplo, a adição de equações para o cálculo da EPE e do calor de solução ou mesmo a construção de conexões entre equipamentos para criar evaporadores de efeito simples, duplo ou triplo. Assim, algumas implementações dos grupos poderiam ser mais simples do que a implementação do “exemplo mínimo”. Todos os cinco grupos desenvolveram as atividades de modo bastante satisfatório e sem as mesmas dificuldades observadas na atividade anterior. Um grupo obteve a nota máxima para a atividade e três grupos não implementaram o cálculo da economia de vapor e tiveram um pequeno desconto na nota. Um grupo chegou à resposta errada sem apresentar problemas de convergência. Para a implementação da atividade deste grupo foi identificado erros de digitação na equação da EPE e de conversão de unidade de medida.

O questionário de percepções quanto às atividades propostas no EMSO foi respondido por 28% dos estudantes. A primeira pergunta dizia respeito ao conhecimento prévio do EMSO. Cem por cento respondeu que não havia tido contato com o simulador anteriormente. A segunda pergunta questionou se eles já haviam utilizado algum outro *software* em aulas de Operações Unitárias e 100% responderam que não. A terceira pergunta avaliou se as explicações iniciais sobre o EMSO e a sua linguagem de modelagem foram suficientes para desenvolver as atividades. De valores entre 1 (insuficiente) e 10 (suficiente), a resposta ficou entre 6 e 10 sendo que 57,1% responderam entre 8 e 9 indicando oportunidades de melhoria. A quarta pergunta questionava sobre a utilidade dos exemplos mínimos para o desenvolvimento das atividades. Um percentual de 71,4% respondeu que os exemplos mínimos foram úteis e o restante indicou a necessidade de material adicional para realizar as atividades. A quinta pergunta avaliou a dificuldade para implementação do projeto de trocador de calor no EMSO. De valores entre 1 (fácil) e 10 (difícil), a resposta ficou entre 3 e 10 indicando que cada estudante teve uma percepção diferente da atividade, mas prevalecendo como uma atividade de dificuldade mediana pela maioria. A sexta pergunta avaliou o mesmo ponto para a implementação do projeto de evaporador. A resposta ficou entre 4 e 10 indicando, novamente, percepções diferentes e que a maioria também considerou a atividade de dificuldade mediana. As sétima e oitava perguntas questionavam se as atividades ajudaram no melhor entendimento dos conceitos visto em aula. A resposta era avaliada entre 1 (discorda) e 10 (concorda). Para a atividade do projeto de trocador de calor, 85,7% responderam entre 8 e 10. Já, para a atividade do projeto de evaporador, 71,4%

responderam entre 8 e 10. Isto indica que a maioria considerou que as atividades no EMSO ajudaram no melhor entendimento dos conteúdos desenvolvidos em aula. A nona e última pergunta era aberta. Ela incentivava o envio de comentários, críticas ou sugestões. Houve duas respostas: (1) “acho que seria útil saber como o *solver* funciona”; (2) “gostei bastante da ideia do trabalho, acredito que é uma forma muito boa de trabalhar com o conteúdo utilizando *softwares*. Uma sugestão é a realização do trabalho em duplas ou individuais, acredito que como foi feito, nem todos conseguem aprender bem sobre o *software*”. A pergunta aberta mostrou o desejo dos estudantes por mais explicações quanto ao funcionamento do EMSO e também, de que todos tivessem a mesma oportunidade de aprendizagem do simulador. Isto indica ótimas oportunidades de melhoria no formato das atividades.

Conclusão

Este trabalho relatou e avaliou uma experiência de uso do simulador EMSO em aulas de Operações Unitárias no projeto de trocadores de calor e evaporadores. As atividades foram desenvolvidas em grupo por estudantes do sexto semestre do curso de graduação em Engenharia Química da UFSM que não tiveram contato prévio com o EMSO. A primeira atividade, que correspondia ao cálculo da área de troca térmica de trocadores de calor, foi desenvolvida satisfatoriamente pela maioria dos grupos sendo que alguns encontraram dificuldade pontuais com a linguagem de modelagem do EMSO. Essas dificuldades foram então contornadas na segunda atividade. Isto sugeriu que o tempo de treinamento dos estudantes no uso do simulador, mesmo curto, foi suficiente. Uma vez implementados, os problemas simulados apresentaram resultados muito próximos ou mesmo idênticos a literatura evidenciando a eficácia do EMSO na solução de problemas numéricos. Os estudantes consideraram que as atividades propostas ajudaram na melhor compreensão dos conteúdos abordados em aula, indicando, assim, que o EMSO conseguiu ser uma ferramenta computacional auxiliar para ensino e aprendizagem de Operações Unitárias. Os estudantes relataram não ter utilizado anteriormente outros tipos de *software* em aulas de Operações Unitárias e que as atividades propostas no EMSO foi um bom modo de abordar os conteúdos usando *softwares*, demonstrando a necessidade do uso mais frequente de ferramentas computacionais.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer aos estudantes da turma de 2021/2 de “Operações Unitárias com Transferência de Calor e Massa I” que gentilmente responderam ao questionário de percepções das atividades propostas no EMSO.

Referências

1. R.P. Soares; A.R. Secchi. EMSO: A new environment for modelling, simulation and optimisation. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2003, 14, 947-952.
2. Google Acadêmico. Citações do artigo “EMSO: A new environment for modelling, simulation and optimisation”. Disponível em: <https://scholar.google.com/scholar?cites=8797707631662723153>. Acesso em: 07 mar. 2022.
3. R. Rodrigues; R.P. Soares; A.R. Secchi. Coleção de 10 problemas numéricos típicos em Engenharia Química resolvidos com o simulador EMSO. In: *Anais do XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, Recife, Brasil, 2008, 17, 1-7.

4. R. Rodrigues; R.P. Soares; A.R. Secchi. Teaching chemical reaction engineering using EMSO simulator. *Computer Applications in Engineering Education*. 2010, 18, 607-618.
5. J. Ospino; M.E. Sánchez; A.R. Secchi. Implementation of a block-oriented model library for undergraduate process control courses in EMSO simulator. *Education for Chemical Engineers*. 2017, 18, 45-57.
6. J.P. Henrique; R. Sousa Jr.; A.R. Secchi; M.A.S.S. Ravagnani; C.B.B. Costa. Optimization of chemical engineering problems with EMSO software. *Computer Applications in Engineering Education*. 2018, 26, 141-161.
7. Núcleo Docente Estruturante. Diretrizes elaboradas pelo Núcleo Docente Estruturante (NDE) para a reforma curricular do Curso de Engenharia Química 2018-2021. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.
8. Universidade Federal de Santa Maria. DEQ1011 – Operações Unitárias com Transferência de Calor e Massa I. Ementário. Santa Maria, 2022. Disponível em: <https://www.ufsm.br/ementario/disciplinas/DEQ1011>. Acesso em: 24 fev. 2022.
9. R.P. Soares. EMSO Manual. UFRGS, Porto Alegre, 2007.
10. R.A. Bowman; A.C. Mueller; W.M. Nagle. Mean temperature difference in design. *Transactions of the A.S.M.E.* 1940, 283-294.
11. T.L. Bergman; A.S. Lavine. *Incropera fundamentos de transferência de calor e de massa*, LTC, Rio de Janeiro, 2019.
12. F. Kreith; R.M. Manglik; M.S. Bohn. *Princípios de transferência de calor*, Cengage Learning, São Paulo, 2014.
13. E.G. Azevedo; A.M. Alves. *Engenharia de processos de separação*, IST Press, Lisboa, 2017.
14. C.J. Geankoplis. *Transport processes and separation process principles (includes unit operations)*, Prentice Hall, Upper Saddle River, 2003.
15. A.S. Foust; L.A. Wenzel; C.W. Clump; L. Maus; L.B. Andersen. *Princípios de operações unitárias*, LTC, Rio de Janeiro, 1982.
16. G.H. Crapiste; J.E. Lozano. Effect of concentration and pressure on the boiling point rise of apple juice and related sugar solutions. *Journal of Food Science*. 1988, 53, 3, 865-868.
17. A. Jancew-Cudier; C. Olivera-Fuentes. A simplified and generalized method to size multiple-effect evaporator systems with any feed scheme. In: *Proceedings of 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering. 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering*. Costa Verde, Brazil, 2005, 1-10.
18. J.A. Irahola. Optimal synthesis of multi-effect evaporation systems of solutions with a high boiling point rise. *Advances in Chemical Engineering*. 2012, 15, 379-404.

19. J.R. Welty; G.L. Rorrer; D.G. Foster. Fundamentos de transferência de momento, de calor e de massa, LTC, Rio de Janeiro, 2017.
20. S.D. Cohen; A.C. Hindmarsh; R. Serban; D. Shumaker; A.G. Taylor. SUNDIALS: Suite of nonlinear and differential/algebraic equation solvers. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA, 2002.