



# APLICAÇÃO COMPUTACIONAL DE PROBLEMAS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA: MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE UM ABSORVEDOR DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

COMPUTATIONAL APPLICATION OF HEAT AND MASS TRANSFER PROBLEMS: MODELING, SIMULATION AND SENSITIVITY ANALYSIS OF AN ABSORBER FOR ABSORPTION REFRIGERATION SYSTEMS

Alvaro Augusto Soares Lima<sup>1</sup>, Alvaro Antonio Villa Ochoa<sup>2</sup>, José Ângelo Peixoto da Costa<sup>3</sup>, Jorge Recarte G. Henriquez<sup>4</sup>, Kleber Lima César<sup>5</sup>, Alisson Cocci de Souza<sup>6</sup>

DOI: 10.37702/REE2236-0158.v42p645-657.2023

**RESUMO:** O objetivo desse estudo é facilitar a análise do fenômeno de transferência de massa em um absorvedor de placas planas, considerando filme descendente, para estudantes de Ciências e Engenharia. Para esse fim, foi utilizado o método de simulação computacional dinâmica (CFD) com o intuito de realizar e construir a modelagem e as simulações do Fenômeno. O estudo foi dividido em três etapas: na primeira foi realizada uma comparação dos resultados obtidos na simulação com os resultados obtidos na literatura; na segunda etapa realizou-se uma análise de variação da porcentagem inicial de amônia na solução absorvente; e na terceira etapa foi realizada uma análise em função da vazão necessária de solução absorvente quando reduzido à concentração inicial de amônia na solução. O nível de complexidade intrínsecos aos problemas de transferência de calor e massa foi satisfatoriamente atenuado pela solução numérica. Os resultados também mostraram, pela condução de análises de sensibilidade, que a redução da fração mássica de amônia na entrada do absorvedor em 39% leva a um aumento de 57% de absorção do vapor refrigerante pelo fluido absorvente. Por último, verificou-se que uma redução de 39% na fração mássica de amônia possibilitaria uma redução de 60% do fluxo mássico.

**PALAVRAS-CHAVE:** Transferência de massa; trocadores de calor; absorção; simulação numérica; CFD; análise paramétrica; ferramenta didática.

**ABSTRACT:** The objective of this study is to facilitate the analysis of the mass transfer phenomenon in a flat plate absorber, considering descending film, for science and engineering students. For these propose, the dynamic computational simulation (CFD) method was used in order to perform and construct the modeling and the simulations of the Phenomenon. The study was divided into three stages; in the first one a comparison of the results obtained in the simulation with the results obtained in the literature was carried out. In the second stage, an analysis of the variation of the initial percentage of ammonia in the absorbent solution was carried out, and in the third stage, the initial concentration of ammonia in the solution. The level of complexity intrinsic to the heat and mass transfer problems was satisfactorily mitigated by the numerical solution The results also showed, by the conducting sensitivity analyses, that the reduction of the mass fraction of ammonia at the inlet of the absorber by 39% leads to a 57% increase in absorption of the cooling vapor by the absorbing fluid. Finally, it can be seen that a reduction of 39% in the mass fraction of ammonia would allow a reduction of 60% of the mass flow.

**KEYWORDS:** Mass transfer; heat exchangers; absorption; numerical simulation; CFD; parametric analysis; refrigeration; didactic tool.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil; PPGEM, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, Brasil; PPGEM, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

<sup>3</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife, Brasil; PPGEM, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

<sup>4</sup> PPGEM, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

<sup>5</sup> Universidade Federal do Piauí, Teresina, Brasil.

<sup>6</sup> PPGEM, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil; Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil.



## INTRODUÇÃO

A maioria das disciplinas dos cursos em Ciências da Natureza e Engenharia envolvem conceitos teóricos complexos os quais são difundidos, normalmente, por meio de aulas teórico-expositivas e que são traduzidos em expressões matemáticas cujo correto entendimento dos parâmetros pode ser desafiador para alguns discentes em processo de familiarização com esses temas. Entre as áreas ministradas, destaca-se a Transferência de Calor e Massa, em que conceitos fundamentais da Termodinâmica, Mecânica dos fluidos e demais áreas da Física convergem, resultando em extenso conteúdo programático essencial ao entendimento de diversos fenômenos da natureza.

Conforme destacam Serra et al. (2020), os alunos de Ciências e Engenharias enfrentam maiores dificuldades de aprendizado justamente com as disciplinas de Termodinâmica e Mecânica dos Fluidos, cujos conceitos e vocabulários específicos se mostram, na maioria das vezes, confusos. Segundo Garcia et al. (2017), a razão para tanto se deve à enorme quantidade de correlações atreladas às várias formulações analíticas necessárias a suas deduções, ao extenso conteúdo programático e, principalmente, à dificuldade de interpretação do significado inerente às grandezas físicas. Esses aspectos consistem em fortes empecilhos ao ensino da Transferência de calor e massa, dado o forte apelo da cognição matemática para a leitura física dos processos envolvido (BROCKINGTON, 2021). Assim, uma estratégia para facilitar o ensino desses conceitos em sala ou em laboratório, conforme afirmam Wehmann et al. (2018), tem sido o uso da simulação numérica, a qual tem se tornado cada vez mais acessível em razão dos avanços alcançados na informática, no que diz respeito principalmente ao poder de processamento, disponibilidade de *softwares* e redução nos custos com *hardwares*.

Por intermédio das simulações numéricas, fenômenos complexos podem ser analisados, reduzindo consideravelmente os níveis de abstração exigidos nos problemas de Transferência de Calor e Massa, bem como identificar quais são os parâmetros de maior influência, a partir de análises de sensibilidade em problemas cuja solução analítica simples nem sempre é possível (GUILHON; ADMIRAL, 2023). Neste sentido, a simulação numérica consiste em forte aliada, facilitando não somente na qualidade de ferramenta didática, mas também no desenvolvimento científico, uma vez que fomenta a redução de custos e tempo para o desenvolvimento de novos produtos (GONÇALVES; ZUCOLOTTO, 2020).



Assim sendo, o propósito deste trabalho é analisar e confrontar os resultados alcançados numericamente para o fenômeno da transferência de massa em um trocador de calor (absorvedor) de placas planas referente a um sistema de refrigeração por absorção, considerando a presença de filme descendente, através da utilização do método de simulação computacional dinâmica (CFD). Para solução numérica foi utilizado o *software* ANSYS-CFX 16.2 que conta com uma versão educacional e que tem como base as equações de Navier-Stokes, solucionadas numericamente pelo método dos volumes finitos (MVF).

O método MVF consiste na discretização do domínio das equações governantes de conservação (massa, momento e energia) e de estado, segundo pequenos volumes de controle não sobrepostos, os quais podem assumir tamanho e formas irregulares. Tanto o centroide como os vértices de cada volume de controle (nós) é passível de serem modelados e suas equações aproximadas numericamente, integrando um sistema algébrico o qual descreve o problema estudado (GONÇALVES; ZUCOLOTTO, 2020) (VERTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A importância de se estudar os processos térmicos nos sistemas de refrigeração por absorção se deve ao fato de serem equipamentos acionados termicamente, de forma direta, através da queima de combustíveis ou de forma indireta, através da utilização de rejeitos térmicos ou fontes de energia renováveis tais como a energia solar térmica (PATANKAR, 1980) (OCHOA; CHARAMBA DUTRA; GERRERO, 2011) (HEROLD; RADAMACHER; SANFORD, 2016).

Nesse sentido, o desempenho desses sistemas depende da eficiência dos processos de transferência de calor e massa em trocadores de calor imersos ou de filme descendente, para processos de absorção e dessorção (ZHAI; SUI; WU, 2021). O processo de absorção é extremamente complexo e envolve não só a transferência simultânea de calor e massa, mas também a dificuldade extra da presença do escoamento de filmes líquidos (ZHAI; SUI; WU, 2021) (TRICHÉ et al., 2017) (OLBRICHT; LUKE, 2018, 2019). No que compete às configurações dos trocadores, vários estudos têm sido realizados visando ao escoamento da solução em tubos verticais e horizontais, incluindo diferentes pares de solução (LIMA et al., 2021) (PANAHI ZADEH et al., 2021) (EBRAHIMNATAJ TIJI; RAMIAR; EBRAHIMNATAJ, 2020) (GIRAUD; VALLON; TREMEAC, 2017) (SUN et al., 2020). Logo, a problemática estudada tem sido objeto de inúmeros estudos.

Neste contexto, o presente artigo pretende abordar os processos de transferência de calor e massa em aplicações reais, tais como sistemas de refrigeração por absorção, assim como estudos relacionados com modelagem numérica utilizando a técnica de dinâmica dos fluidos computacional do curso de

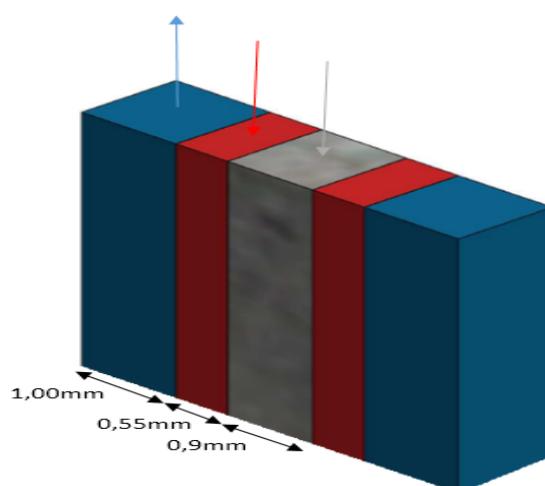


Engenharia Mecânica do IFPE campus Recife; portanto, para atender a essas demandas, foi direcionado o presente estudo, o qual foi dividido em três etapas: na primeira etapa foi realizada uma simulação em que foram inseridos os parâmetros de entrada utilizados por Triché et al. (2016), a fim de validar o modelo adotado na metodologia. Na segunda etapa foi realizada uma comparação entre o comportamento da fração mássica de amônia na solução absorvente quando variada a concentração de amônia na entrada do absorvedor. Por fim, na terceira etapa, foi realizada uma redução da fração mássica de amônia e da vazão da solução absorvente e comparado seu resultado com o resultado da primeira etapa.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O absorvedor de placas planas de filme descendente analisado é caracterizado por um escoamento paralelo entre o vapor refrigerante e a solução absorvente (escoamento do topo para a base do absorvedor); porém o fluxo de fluido de arrefecimento ocorre em contracorrente com os demais fluidos. As características geométricas do absorvedor são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – Absorvedor de placa plana



Fonte: acervo dos autores.



Um modelo numérico foi utilizado a fim de se estudar o fenômeno de transferência de massa no absorvedor, para a realização do estudo foi utilizado o *software* CFX 16.2 da empresa Ansys, que é baseado nas equações de Navier-Stokes. Para isso algumas considerações foram estabelecidas para realização da simulação numérica, são elas:

- 1) a absorção é realizada em processo estacionário;
- 2) foi assumido um modelo unidimensional;
- 3) as placas do absorvedor são assumidas planas e paralelas;
- 4) o diâmetro da bolha de vapor é considerado constante com diâmetro 1,4 mm baseados no dado de entrada de Kang, Kashiwagi e Christensen (1998);
- 5) a interface entre a fase líquida e vapor é considerada em equilíbrio.

Para validar o estudo, os resultados obtidos com a simulação foram comparados com os obtidos no trabalho de Triché et al. (2016).

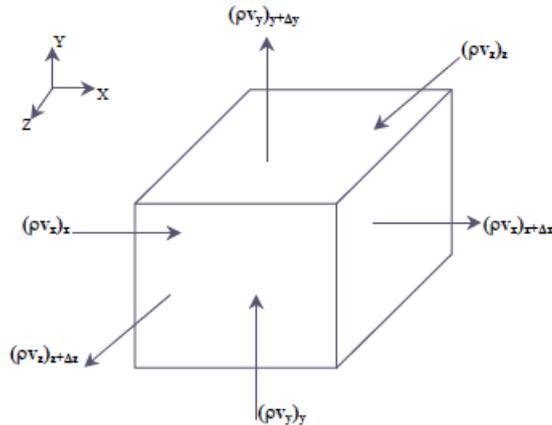
O modelo matemático adotado na análise é baseado no balanço de massa, balanço de espécie que ocorre entre a fase líquida, vapor e a interface. A seguir são apresentados os modelos utilizados neste estudo.

### Balanço de massa

A equação da conservação da massa utilizada internamente no *software* é dada a seguir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Como no presente trabalho será realizada uma análise em regime permanente, a Equação 1 assume a forma apresentada na Equação 2, representada no volume finito da Figura 2, na qual é apresentado o fluxo de massa líquida entrando e saindo do elemento de controle.

**Figura 2 – Balanço de massa no volume de controle**


Fonte: Ropelato (2023).

### Balanço de espécies

Para o balanço de espécies foi utilizado o modelo de duas resistências presentes no *software* escolhido, que permite a transferência de massa de ambas as fases, líquida e vapor (BIRD; STWEART; LIGHTFOOT, 2017). Para a fase vapor foi adotado que não há resistência à transferência de massa da amônia e do vapor de água para as suas fases líquidas.

No entanto, para a transferência de massa da água e da amônia na fase líquida para a fase vapor, foi utilizada a correlação de Hughmark, apresentada a seguir, onde ela fornece o número de Sherwood, que posteriormente é substituído na Equação 4 para o fornecimento do coeficiente de transferência de massa da fase líquida.

$$\text{Sh} = \begin{cases} 2 + 0,6 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}^{0,33} & 0 \leq \text{Re} < 776,06 \quad 0 \leq \text{Pr} < 250 \\ 2 + 0,27 \text{Re}^{0,62} \text{Pr}^{0,33} & 776,06 \leq \text{Re} \quad 0 \leq \text{Pr} < 250 \end{cases} \quad (3)$$

$$k = \frac{\text{Sh} \cdot \rho \cdot D}{d} \quad (4)$$

Para estabelecer o equilíbrio na interface é utilizada uma relação de fração mássica apresentada a seguir:



$$k = \frac{X_{aA}}{X_{aB}} \quad (5)$$

Para a amônia, tem-se que A é a fase líquida e B é a fase vapor. Para a água e o vapor de água, tem-se que A é a fase vapor, enquanto B é a fase líquida.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Conforme discutido, este estudo foi fragmentado em três etapas, no sentido de avaliar o fenômeno da transferência de massa no trocador de calor analisado. Todas as etapas foram conduzidas com o auxílio do software CFX 16.2 da ANSYS.

### Primeira etapa

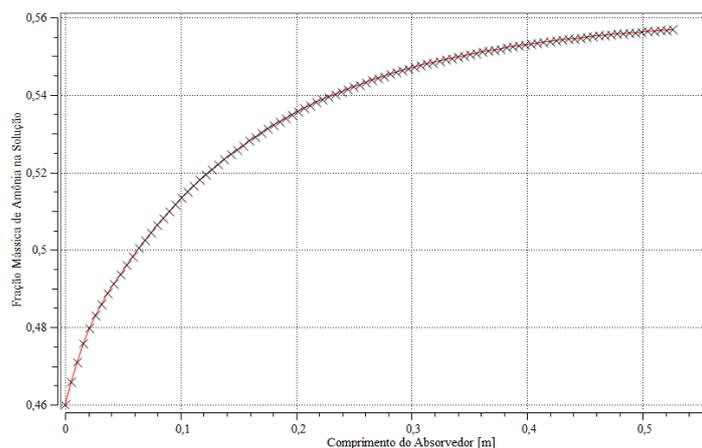
Nessa etapa foi realizada uma análise utilizando os dados de entrada apresentados na Tabela 1, retirados do trabalho de Triché et al. (2016):

**Tabela 1 – Valores de entrada para primeira simulação segundo**

Fluxo mássico de vapor refrigerante [Kg/s]	Fluxo mássico de solução absorvente [Kg/s]	Concentração de amônia na solução absorvente	Concentração de amônia no vapor refrigerante
0,00525	0,0167	0,46	0,995

Fonte: Triché et al. (2016).

A partir dessa análise, obtém-se um erro de 6,7% quanto ao valor da fração mássica de amônia na saída do absorvedor. Triché et al. (2016) obtiveram um valor de 0,597 enquanto o presente trabalho obteve 0,557. A Figura 3 apresenta o comportamento da fração mássica de amônia no absorvedor para o caso analisado, em que se observa um aumento da fração de amônia presente na solução absorvente na medida em que o fluido percorre o absorvedor.


**Figura 3 – Fração mássica de amônia da solução no absorvedor**


Fonte: acervo dos autores.

## Segunda etapa

Na Figura 4 é apresentado o comportamento da fração mássica de amônia para os dados de entrada apresentados na Tabela 2. A diferença entre as duas análises realizadas nessa etapa está na fração mássica de amônia presente na solução absorvente na entrada do absorvedor. Para a primeira análise há uma concentração de 0,46 de amônia na solução, enquanto para a segunda análise existe uma concentração de 0,28.

**Tabela 2 – Valores de entrada para a segunda etapa**

Análise	Fluxo mássico de vapor refrigerante [Kg/s]	Fluxo mássico de solução absorvente [Kg/s]	Concentração de amônia na solução absorvente	Concentração de amônia no vapor refrigerante
1 <sup>a</sup>	0,00525	0,0167	0,46	0,995
2 <sup>a</sup>	0,00525	0,0167	0,28	0,995

Fonte: elaborada pelos autores.

Esta diferença de concentração de amônia na entrada do absorvedor proporciona uma maior capacidade de absorção de fluido refrigerante, embora, conforme se verifica na Figura 4, a primeira análise apresente uma maior concentração de amônia na saída do absorvedor. Quando observada a diferença entre a entrada e a saída do equipamento é possível notar que há um aumento de 21% no percentual de amônia presente na solução absorvente da primeira análise. Para a segunda análise, por sua vez, ocorre um aumento de 54%,

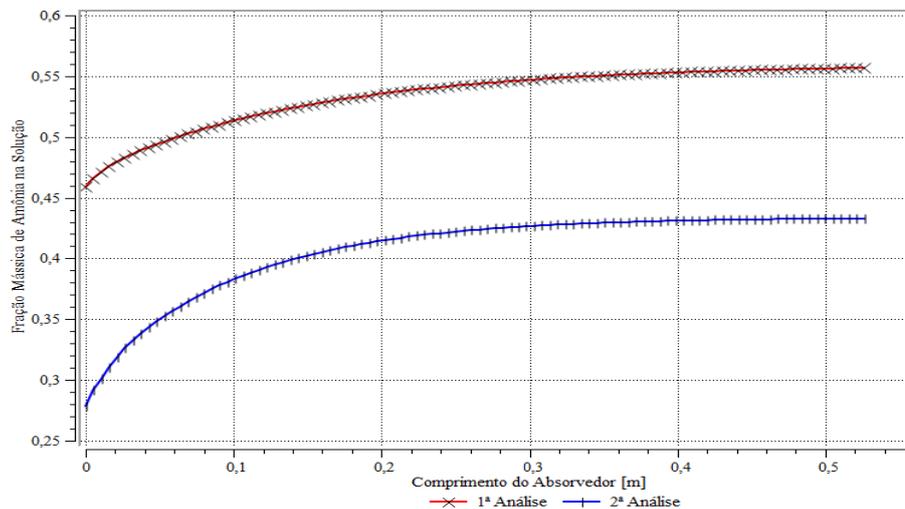


o que representa uma melhor capacidade de absorção e resulta em um melhor desempenho e conseqüentemente um melhor COP do equipamento.

### Terceira etapa

Nessa etapa foi avaliado o impacto da redução da fração mássica de amônia da solução absorvente na entrada do absorvedor, no fluxo da solução, para isso foi reduzida a fração mássica na entrada do absorvedor e também foi reduzida a vazão até que os valores de fração mássica na saída do absorvedor para as duas análises estivessem próximos. Os valores de entrada estão apresentados na Tabela 3. Pode-se observar na Figura 5 que ambas as análises possuem resultados similares, na saída, quanto a absorção de amônia pela solução absorvente. Isso ocorre devido à diferença de vazão, que compensa o elevado percentual de amônia na solução da primeira análise.

**Figura 4 – Fração mássica de amônia na solução ao variar a concentração inicial de amônia**



Fonte: acervo dos autores.

**Tabela 3 – Valores de entrada para a 3ª etapa**

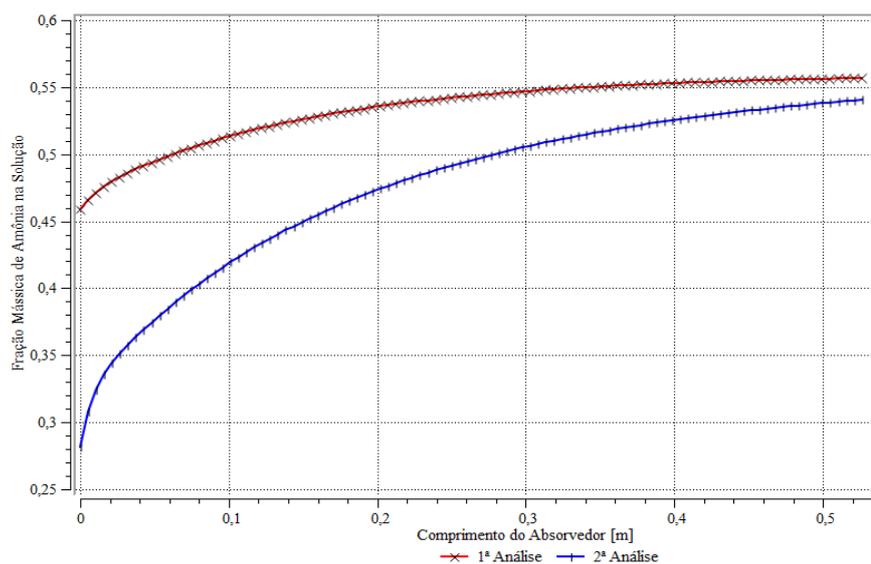
Análise	Fluxo mássico de vapor refrigerante [Kg/s]	Fluxo mássico de solução absorvente [Kg/s]	Concentração de amônia na solução absorvente	Concentração de amônia no vapor refrigerante
1ª	0,00525	0,0167	0,46	0,995
2ª	0,00525	0,00333	0,28	0,995

Fonte: elaborada pelos autores.



A partir dessa análise, pode-se observar a importância de um correto dimensionamento dos componentes do chiller de absorção, visto que uma redução de 39% no percentual de amônia presente na entrada do absorvedor levaria a uma redução de 60% do fluxo mássico da solução absorvente. Sendo assim, torna-se necessário um menor funcionamento da bomba responsável por transportar a solução de volta para o gerador, o que levaria ao aumento do COP, além de uma redução no tamanho dos equipamentos.

**Figura 5 – Fração mássica de amônia quando alteradas a vazão e a concentração**



Fonte: acervo dos autores.

## CONCLUSÕES

A simulação computacional, na qualidade de ferramenta de ensino, corresponde a um recurso didático poderoso, uma vez que facilita a visualização de conceitos abstratos, fomenta a compressão intuitiva de parâmetros-chave e a abordagem interativa com as possíveis soluções do problema.

O nível de complexidade relativo aos processos de transferência de massa no absorvedor de placa plana, o qual incluiu neste trabalho cenários complexos – tais como a presença de duas espécies químicas, a variação de concentração dessas espécies, fases distintas e a presença de escoamento na fase líquida – pode ser satisfatoriamente reduzido pela ferramenta numérica, implementada com o auxílio da ferramenta CFD. Sem mencionar a economia de tempo e recursos alcançáveis



por estratégia, consistindo também em uma boa alternativa para o desenvolvimento de pesquisa.

A análise de sensibilidade conduzida neste trabalho permitiu evidenciar quais parâmetros foram os dominantes nas distribuições de massa e concentração, auxiliando na compreensão da influência desses fatores na transferência de massa intrínseca ao trocador de calor abordado. Afinal, esses dispositivos correspondem aos principais responsáveis pela eficiência energética dos refrigerados por absorção.

Mesmo utilizando uma metodologia diferente da adotada no trabalho de Triché et al. (2016) e realizando uma análise de modo simplificado, pôde-se observar que os resultados são próximos daqueles encontrados na literatura, obtendo-se neste trabalho um erro de 6,7% quando comparado com os resultados divulgados por Triché et al. (2016) em sua abordagem.

Também se pode concluir que uma menor quantidade de amônia presente na entrada do absorvedor é essencial para um melhor desempenho do equipamento, visto que uma redução de 39% do percentual de amônia na solução absorvente na entrada do absorvedor leva a um ganho de 57% na capacidade de absorção do equipamento.

Por último, tem-se que para conseguir uma determinada taxa de absorção podem ser utilizados dois métodos: 1) utilizando uma vazão mássica elevada e uma porcentagem inicial de amônia também elevada; 2) utilizando uma baixa concentração de amônia na entrada do absorvedor, juntamente com uma baixa vazão mássica.

Porém, esse último método levaria a escolha de componentes menores, além de reduzir o uso da bomba, o que levaria a melhores desempenhos, visto que uma redução de 39% do percentual de amônia da solução absorvente na entrada do absorvedor levaria a uma redução de 60% do fluxo mássico necessário.

## **Agradecimentos**

O primeiro autor agradece à CAPES pelo apoio financeiro (através da bolsa de mestrado) para o desenvolvimento deste trabalho. Os autores agradecem à FACEPE/Cnpq pela ajuda financeira através do projeto de pesquisa APQ-0151-3.05/14, assim como também ao CNPq pelo financiamento através do projeto Universal 402323/2016-5. O segundo autor agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade nº 3303417/2022-6.



## REFERÊNCIAS

- BIRD, R.B.; STWEART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2017.
- BROCKINGTON, G. **Rev. Bras. Ensino Física**, vol. 43, 430, 2021.
- CÉZAR, K.L. et al. **Int. J. Refrig.**, vol. 111, 2020.
- EBRAHIMNATAJ TIJI, A.; RAMIAR, A.; EBRAHIMNATAJ, M., **SN Appl. Sci.**, 2, 1, 2020.
- GARCIA, R. L. et al. **Rev. Bras. Ensino Fis.**, 39, 280, 2017.
- GIRAUD, F.; VALLON, P.; TREMEAC, B. **Int. J. Refrig.**, 77, 74, 2017.
- GONÇALVES, S. A. R; ZUCOLOTTI, B. **Rev. Bras. Ensino Fis.**, 42, 313, 2020.
- GUILHON, I.; ADMIRAL, T. D. **Rev. Bras. Ensino Fis.**, 45, 256, 2023.
- K. E. HEROLD, R. RADAMACHER, AND A. K. SANFORD, **Absorption Chillers and Heat Pumps**, Taylor & Francis, Boca Raton, 2016.
- KANG, Y. T; KASHIWAGI, T.; CHRISTENSEN, R. N. **ASHRAE Transactions**, vol. 104, 1565, 1998.
- LIMA, A. A. S. Michima A.M.A Caldas, **Energies**, 14, 48, 2021.
- OCHOA, A. A. V; CHARAMBA DUTRA, J. C.; GERRERO, J. R. H. **Introdução à análise de sistemas de refrigeração por absorção**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2011.
- OLBRICHT, M.; LUKE, A. **Heat Mass Transf.**, vol. 54, 2507, 2018.
- OLBRICHT, M.; LUKE, A. **Heat Mass Transf.**, vol. 55, 81, 2019.
- PANAHIZADEH, F. et al. **Therm. Sci.**, 25, 1599, 2021.
- PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Taylor & Francis, Boca Raton, 1980.
- ROPELATO, K. **Escoamentos Multifásicos: Fundamentos e Modelagem Computacional**, **IESSS**, 2023. Disponível em: <https://www.esss.co/iesss/cursos-online/modelagem-computacional-escoamentos-multifasicos-ansys-cfd/>. Acessado em: 06 ago. 2022.
- SERRA, G. F. et al., **Rev. Bras. Ensino Fis.**, 42, 174, 2020.
- SUN, F. et al. **Energy**, 193, 116707, 2020.
- TRICHÉ, S. et al. **Int. J. Heat Mass Transf.**, 111, 374, 2017.
- TRICHÉ, S. et al. Modeling and Experimental Study of an Ammonia-water Falling Film Absorber, **Energy Procedia**, vol. 91, 857, 2016.



VERTEEG, H. K; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method**. London: Editora Pearson, 2007.

WEHMANN, P. A. C. et al. **Rev. Bras. Ensino Fis.**, 40, 221, 2018.

WIRTZ, M. et al. *Heat Mass Transf.*, **58**, pp. 431, 2022.

ZHAI, C.; SUI, Z.; WU, W. **Appl. Therm. Eng.**, vol. 186, 116554, 2021.

### LISTA DE SÍMBOLOS

$\nabla$	Operador nabla	Re	Número de Reynolds
V	Velocidade, m/s	Pr	Número de Prandtl
k	Constante de equilíbrio da fração mássica	Sh	Número de Sherwood
d	Diâmetro médio da partícula, mm	$X_{\alpha A}$	fração mássica da substância $\alpha$ na fase A
D	Difusividade térmica, $m^2 s^{-1}$	$X_{\alpha B}$	fração mássica da substância $\alpha$ na fase B
$\rho$	Massa específica, $kg m^{-3}$	$\nabla \rho V$	Fluxo líquido de massa