



XVIII CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR
São Paulo Expo – 13 à 15 de setembro de 2023

SIMULAÇÃO E ANÁLISE NUMÉRICA DO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA SIMULTÂNEO DE UM ABSORVEDOR UTILIZANDO AMÔNIA COMO FLUIDO DE TRABALHO

PAPER 38

RESUMO

Com o aumento do consumo de energia e a preocupação com o aquecimento global, os sistemas de refrigeração por absorção estão se tornando cada vez mais populares. Eles utilizam rejeitos **térmicos de outros processos para a remoção de calor**, o que os torna mais eficientes e adequados para a tentativa de reparação global. No entanto, é necessário estudar sobre transferência de calor e massa para dimensionar corretamente os componentes do sistema e principalmente o absorvedor, a fim de melhorar sua eficiência. Além disso, a cogeração não é contida apenas ao meio industrial, a climatização de edifícios também pode se beneficiar desse tipo de sistema de refrigeração. Portanto, este trabalho **visa o estudo de transferência de calor e massa em absorvedores de ciclos de refrigeração por absorção, utilizando a técnica de dinâmica de fluidos computacional (CFD)**, para a modelagem matemática. O absorvedor estudado é do tipo de placas, utilizando a mistura amônia-água como fluido de trabalho. Foi realizada uma análise paramétrica em diversos parâmetros de operação tais como: vazão do fluido e fração mássica. Os resultados mostraram que a distribuição de temperatura apresenta uma troca térmica maior entre os fluidos no centro do equipamento e temperatura mais altas nas proximidades das paredes do trocador. Além disso, foi observado que a geometria poderia ser otimizada em função da estabilização do fenômeno de absorção após os 210 mm do comprimento do absorvedor.

Palavras-chave: Chiller de absorção, Amônia, CFD.

ABSTRACT

With increasing energy consumption and concerns about global warming, absorption refrigeration systems are becoming increasingly popular. They utilize thermal waste from other processes **for heat removal**, which makes them more efficient and suitable for attempting a global repair. However, it is necessary to study heat and mass transfer to correctly size the system components, especially the absorber, to improve its efficiency. In addition, cogeneration is not restricted to the industrial environment; the air conditioning of buildings can also benefit from this type of cooling system. Therefore, this **work aims to study heat and mass transfer in absorbers of absorption refrigeration cycles using the computational fluid dynamics (CFD)** technique for mathematical modeling. The absorber studied is of the plate type, using an ammonia-water mixture as the working fluid. A parametric analysis was performed on several operating parameters, such as fluid flow and mass fraction. The results showed that the temperature distribution presents a greater thermal exchange between the fluids in the center of the equipment and higher temperatures near the exchanger's walls. Furthermore, it was observed that the geometry could be optimized due to the stabilization of the absorption phenomenon after the 210 mm length of the absorber.

Keywords: Absorption chiller. Ammonia. CFD

1 INTRODUÇÃO

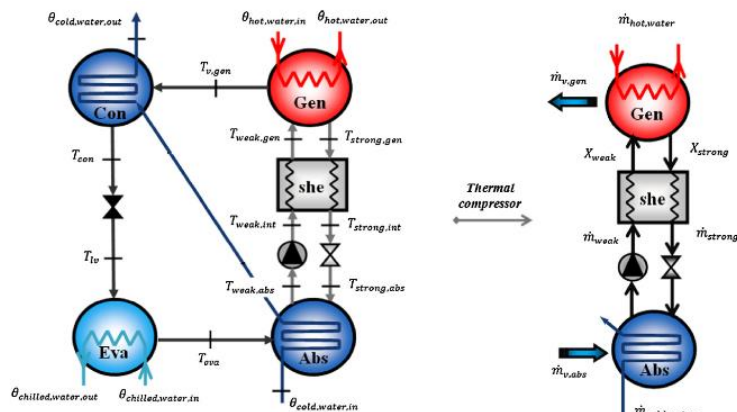
O absorvedor é o componente chave dos sistemas de refrigeração por absorção, já que é através dele, que é possível a transferência de calor e massa da solução aquosa, com base na troca de calor com fluido refrigerante, a partir da afinidade entre os componentes do fluido e a dissipação de calor no trocador de calor (Ochoa et al., 2017, 2016).

Atualmente, com o crescimento populacional e os problemas de aquecimento global, aumentaram, por consequência o consumo de energia e a utilização de sistemas de refrigeração na indústria e em meios domésticos. Considerando o cenário de tentativa de reparação global, os sistemas de refrigeração por absorção ganharam visibilidade, uma vez que é utilizado os rejeitos térmicos de outros processos para gerar frio. O interesse em ciclos avançados de refrigeração por absorção aumentou nos últimos anos devido à necessidade de se obter equipamentos de absorção mais eficientes, com menor consumo de potência e adequados para a utilização de calor residual (Alcântara et al., 2019). No entanto, para aproveitar eficientemente esses rejeitos, é necessário dimensionar corretamente os componentes do sistema e principalmente o absorvedor, onde para melhorar a eficiência é necessário estudar sobre transferência de calor e massa.

Pode-se dizer que, enquanto ciclos de compressão a vapor são caracterizados pelo consumo de energia, especificamente pelo trabalho exercido pelo compressor mecânico acionado por eletricidade, os ciclos de refrigeração por absorção são acionados através do uso de calor, sendo assim, a maior parte do custo de operação está associada ao fornecimento de calor, cuja responsabilidade é liberar o vapor de uma solução líquida a alta pressão (Prata, 2012). Porém, a cogeração não é contida apenas ao meio industrial, a climatização de edifícios representa uma parcela considerável no consumo elétrico com valores que variam entre 30 e 40% do total e diante do atual cenário de prevenção ambiental e consumo racional de energia, tem se notado um interesse em sistemas de refrigeração por absorção.

Os equipamentos de refrigeração por absorção (Figura 1), são constituídos por trocadores de calor, onde o compressor mecânico é substituído por um compressor térmico conformado por um gerador, absorvedor e um trocador intermediário (Herold e Rademacher, 2016). Desta forma, pode se dizer que este compressor térmico representa a parte mais importante do processo de transferência de calor e massa, para que possa ser gerado água gelada para os processos de climatização e refrigeração.

Figura 1 — Ciclo básico de refrigeração por absorção



Fonte: (Ochoa et al., 2016)

2 FUNDAMENTOS

2.1 Ciclo de refrigeração por absorção

A refrigeração por absorção foi idealizada por Edward Nairne em 1777, com bombas de vácuo para evaporar água e ácido sulfúrico para absorver o vapor da água. Em 1810, a primeira máquina começou a funcionar de forma intermitente, produzida por John Leslie, porém só foi comercializada quatro décadas depois por Edmund Carré em restaurantes da França, Inglaterra e Austrália. Nas décadas seguintes houve alterações como a utilização do par água-brometo de lítio e amônia-água, e em 1950, foi construída a primeira máquina duplo efeito a água-brometo de lítio por E. P. Whitlow, o ciclo de triplo efeito foi patenteado por Ouchi nos anos 80.

Um sistema simplificado de refrigeração por absorção e um sistema convencional por compressão a vapor possuem características comuns, ambos são formados por um condensador, um evaporador e uma válvula de expansão (Ochoa et al., 2011). A principal diferença entre ambos está na presença de uma unidade térmica que substitui o compressor do sistema convencional. Algumas das vantagens e desvantagens dos sistemas de refrigeração por absorção são mostradas na tabela 1 (Herold e Radermacher, 2016; Ochoa et al., 2011).

De acordo com a literatura especializada (Herold e Radermacher, 2016) os sistemas de refrigeração por absorção podem ser classificados em:

- Sistema de refrigeração de simples efeito;
- Sistema de refrigeração de duplo efeito;
- Ciclo de refrigeração de médio efeito;
- Ciclo de refrigeração de triplo efeito;
- Ciclo de reabsorção.

Tabela 1 — Vantagens e desvantagens dos sistemas de absorção

| Vantagens | Desvantagens |
|--|---|
| Reduzem o consumo elétrico | Os chillers de absorção são maiores em relação aos chillers de compressão |
| Fazem o uso da cogeração | COP relativamente baixo comparado ao ciclo de compressão |
| Baixo custo de manutenção | Custo inicial relativamente alto |
| Funcionamento silencioso e livre de vibração | Necessita de torres de resfriamento maiores que os chillers de compressão |

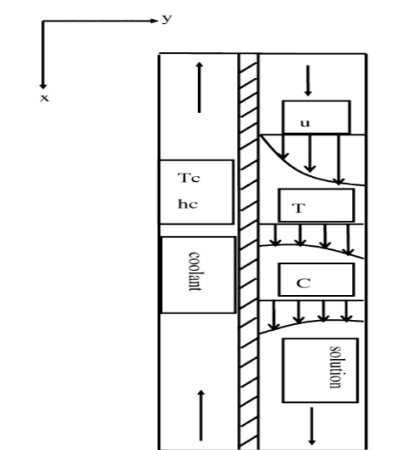
Fonte: Elaborado pelos autores

2.2 Tipos de absorvedor

O absorvedor é um dos principais equipamentos, quando se trata de performance do equipamento (Lima, 2016). Existem vários tipos de absorvedores e os que mais se destacam durante pesquisas são os que utilizam regime de filme descendente e os que utilizam o regime de bolhas.

- Absorvedores de borbulhamento: são do tipo inundado, a solução pobre de refrigerante entra pelo tubo central enquanto o vapor é adicionado em forma de bolha; a dissipação do calor ocorre por meio da água de resfriamento que circula do lado externo do tubo; possuem um alto coeficiente de transferência de calor e massa.
- Absorvedores de filme descendente (Figura 2): bem como os de borbulhamento, possuem alto coeficiente de transferência de calor e massa; apresentam estabilidade durante a operação.

Figura 2 — Absorvedor de filme descendente



Fonte: (Bo et al., 2010)

2.3 Pares Refrigerantes

Existem diversas combinações de pares de refrigerantes e absorventes, dentre

os mais usados estão o brometo de lítio e água ($\text{BrLi}/\text{H}_2\text{O}$) e amônia e água ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$), que foi o par utilizado neste trabalho, características na tabela 2. O desempenho do sistema depende do uso de um par absorvente adequado, onde as substâncias atendam a alguns requisitos para serem combinadas como, afinidade entre absorvente e refrigerante, a relação em que o refrigerante seja mais volátil que o absorvente, entre outros pontos (Herold e Radermacher, 2016).

Tabela 2 — Características do sistema amônia-água

| Absorção Amônia-Água | Absorção Amônia-Água |
|---|---------------------------------------|
| Pressão positiva no ciclo – não apresenta infiltração | Não precisa de bomba de vácuo |
| Capacidade de atingir temperaturas negativas | Baixa manutenção |
| Condensação em altas temperaturas: permite condensação a ar | Não apresenta cristalização |
| Não necessita de torre de resfriamento a água | Menor rendimento térmico do ciclo |
| Permite reaproveitamento de calor | Não compatível com cobre e suas ligas |

Fonte: Lima, 2016

Segundo a literatura (Herold e Radermacher, 2016) algumas características desejáveis para um agente refrigerante, são as seguintes:

- Ser volátil;
- Apresentar calor latente de vaporização elevado;
- Requerer o mínimo de potência para a compressão à pressão de condensação;
- Apresentar temperatura crítica muito acima da temperatura de condensação;
- Ser estável e sem tendência a se decompor nas condições de funcionamento;
- Não ser combustível ou explosivo nas condições normais de funcionamento.

3 METODOLOGIA

O estudo foi implementado com o método **dinâmica** computacional dos fluidos utilizando o software ANSYS-CFX 19.0, através da resolução das equações de Navier-Stokes. O modelo desenvolvido de transferência de calor e massa, é baseado no estudo prévio de (Lima et al., 2019), considerando um modelo heterogêneo. Esta simplificação leva a redução do esforço

computacional, pois reduz o número de equações que terão que ser resolvidas. As equações de conservação de massa, energia e momento foram utilizadas para análise da transferência de calor e análise de massa. Entre as hipóteses adotadas estão:

- Análise Bidimensional;
- Vazão distribuída de vapor;
- Mistura uniforme de vapor e solução absorvente;
- Fluxo em estado estacionário;
- Resistência zero para transferência de calor e massa adotada para o vapor refrigerante.

3.1 Equações governantes do processo de transferência de calor e massa

Foram utilizadas as três equações principais, neste caso, equação de conservação da massa, conservação de quantidade de movimento, e de energia.

A equação 1 mostra a forma geral da equação de conservação de massa para um escoamento estacionário:

$$\nabla(\rho\vec{v}) = S_m \quad (1)$$

Onde \vec{v} é o vetor velocidade, ρ densidade e S_m o termo fonte de massa, que representa a quantidade de massa transferida entre as fases vapor (vapor refrigerante) e líquido (solução absorvente) dada pela equação 2.

$$S_m = \dot{m}_{p,q} = k_{p,q}A_i(\rho_{q,e}^i - \rho_q^i) \quad (2)$$

Onde: A_i é a área da interface de transferência entre as duas fases, $\rho_{q,e}^i$ é o equilíbrio do balanço de massa da espécie (amônia) na fase líquida, ρ_q^i é a concentração de massa da espécie i (amônia) na fase líquida e $k_{p,q}$ é o coeficiente de transferência de massa entre as fases de vapor e líquido,

A equação 3 mostra o esquema geral da conservação da quantidade de movimento em escoamento estacionário.

$$\nabla(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \rho\vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

Onde o termo do lado esquerdo da igualdade representa a variação da quantidade de movimento que atravessa as superfícies de controle, p é a pressão estática, $\rho\vec{g}$ é a força gravitacional, ρ é a densidade, \vec{v} é a velocidade e \vec{F} são as forças externas que atuam sobre o corpo resultante da interação entre as fases na interface.

A equação 4 mostra a forma geral da equação de conservação de energia para um escoamento em estado estacionário.

$$\nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla(k\nabla T - \sum_j h_j J_j) + S_h \quad (4)$$

Onde o termo da esquerda é a transferência de calor por convecção, p é a pressão, ρ é a densidade e E é a energia do fluido; h é a entalpia sensível. O primeiro termo entre parênteses no lado direito da igualdade é a difusão de calor e o segundo termo entre parênteses é o termo de interdifusão, que representa a quantidade de calor transportada pelo fluxo de massa. A

variável k representa a condutividade do fluido, J_j é o fluxo de difusão das espécies.

3.2 Geometria do absorvedor

A geometria do modelo numérico foi baseada nos modelos e equações apresentadas em Lima, 2018, onde, foi desenhado um absorvedor de um chiller de absorção em 3D (Figura 3a e Figura 3b) utilizando um modelo de filme descendente, com dimensões de 111mm de profundidade, 526mm de comprimento e um espaçamento de 2mm entre as placas.

Figura 3 — a) Ilustração semelhante à geometria 3D. b) Geometria em software



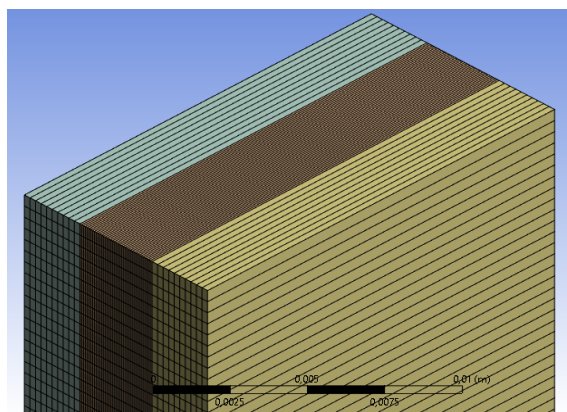
Fonte: (Lima, Soares, 2018)

Esse modelo foi exportado para o software de simulações fluidodinâmicas (CFD-CFX) da ANSYS, onde foi analisado comportamento da fração mássica de amônia na solução absorvente.

3.3 Malha e interações

A malha escolhida (Figura 4) é fundamental para a exatidão dos resultados e deve ser levada em consideração no momento de simular.

Figura 4 — Malha escolhida



Tendo em vista que simulações de transferência de calor e massa são mais densas e detalhadas, a malha escolhida pode ser considerada grosseira no

meio de projetos, mas sofisticada em consideração das limitações do software em versão estudantil. O tempo de simulação foi mais longo também devido à necessidade de aumentar as interações entre os elementos.

4 RESULTADOS

Esta seção mostra a análise paramétrica considerando variação da vazão, frações mássicas, assim como as interações de simulação. No trabalho apresentado em Lima, 2018 foi apresentada a validação completa do modelo desenvolvido utilizando trabalhos numéricos e experimentais, confirmando a veracidade e coerência dos resultados. Os dados foram obtidos a partir das condições de entrada apresentadas na tabela 3, que foram utilizadas a partir do trabalho de Cerezo (2006) e Lima (2018).

Tabela 3 — Condições de contorno e entrada para validação

| | |
|---|-----------|
| Vazão de vapor refrigerante (kg·s⁻¹) | 0,000025 |
| Vazão de solução absorvente (kg·s⁻¹) | 0,0000875 |
| Vazão de fluido de arrefecimento (kg·s⁻¹) | 0,00114 |
| Temperatura do vapor refrigerante (°C) | 28,6 |
| Temperatura da solução absorvente (°C) | 65,8 |
| Temperatura do fluido de arrefecimento (°C) | 46,8 |
| Fração mássica de amônia na solução absorvente | 0,26 |
| Fração mássica de amônia no vapor refrigerante | 1 |

Fonte: Lima, 2016

4.1 Variação da Fração Mássica

Primeiramente, os testes foram feitos com diferentes frações mássicas numa faixa entre 0,29 e 0,25, e havendo 500 e 700 interações no programa para cada uma delas. No entanto, para frações como 0,29 e 0,27 (Figura 5) os resultados desejados só poderiam ser obtidos acima de 700 interações, o que não foi possível testar devido às limitações do computador utilizado na simulação, tal qual houve para a escolha da malha.

Para a obtenção dos resultados esperados, em 0,26 e 0,25 foram utilizadas 500 interações, mas apenas os resultados de fração em 0,26 foi considerado por apresentar estabilidade no processo de simulação. Essa estabilidade foi de extrema importância para a obtenção de dados como gradiente de temperatura do processo (Figura 6) e gráfico perfil de temperatura, onde no primeiro caso pode-se identificar a mudança sutil da temperatura e sem oscilações relevantes no processo de transferência de calor.

Figura 5: Resultados de Temperatura do Vapor

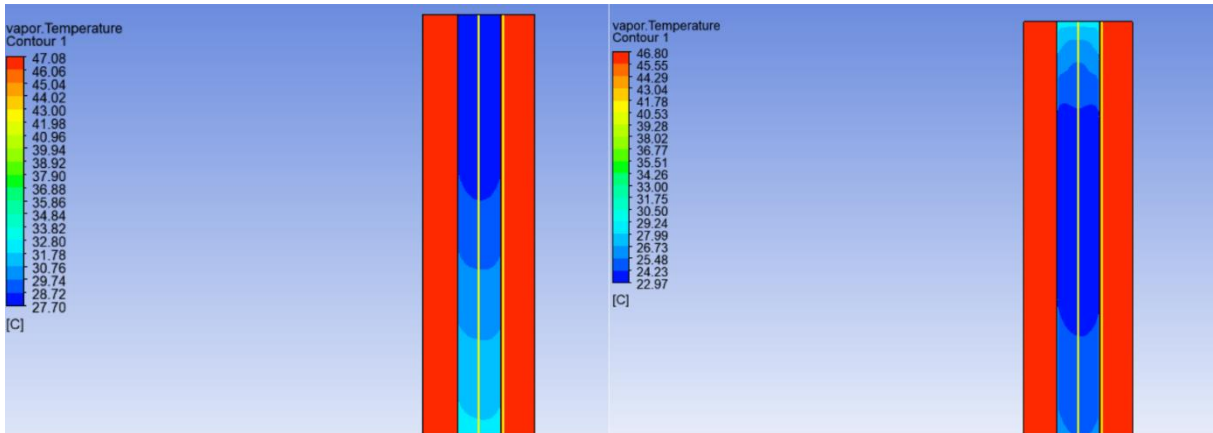
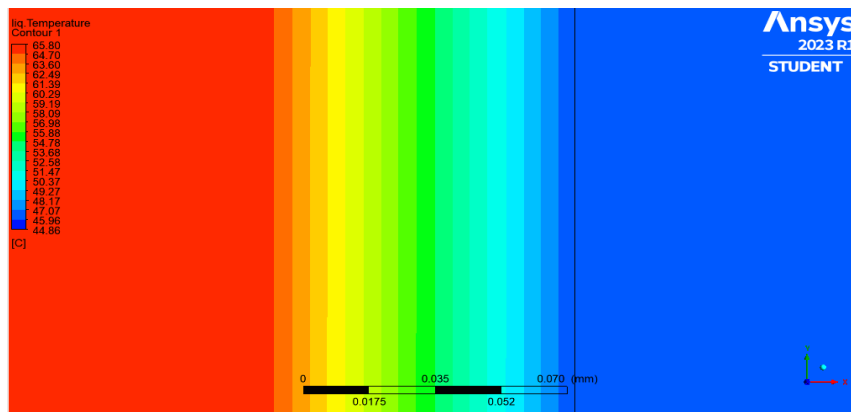


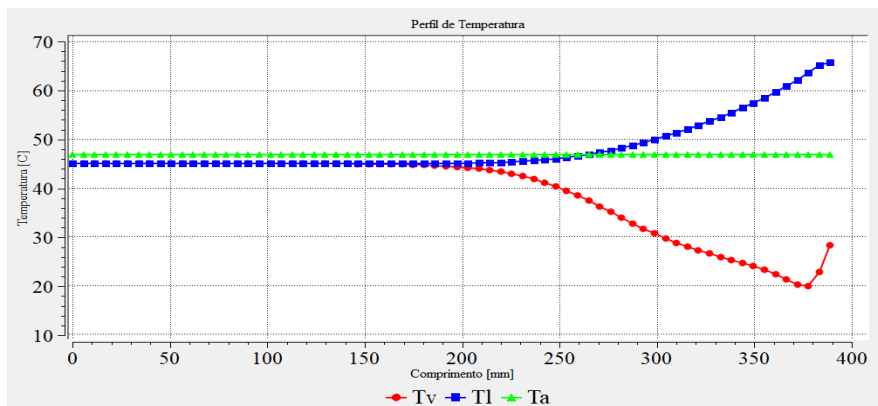
Figura 6: Gradiente de temperatura



4.2 Comportamento da Temperatura

No caso de perfil de temperatura (Figura 7), observou-se a troca de calor dos fluidos T_v (refrigerante), T_l (absorvente) e T_a (arrefecimento), que se estabiliza após aproximadamente 210 mm percorridos, demonstrando uma possível otimização na geometria para o trocador de calor.

Figura 7: Perfil de temperatura



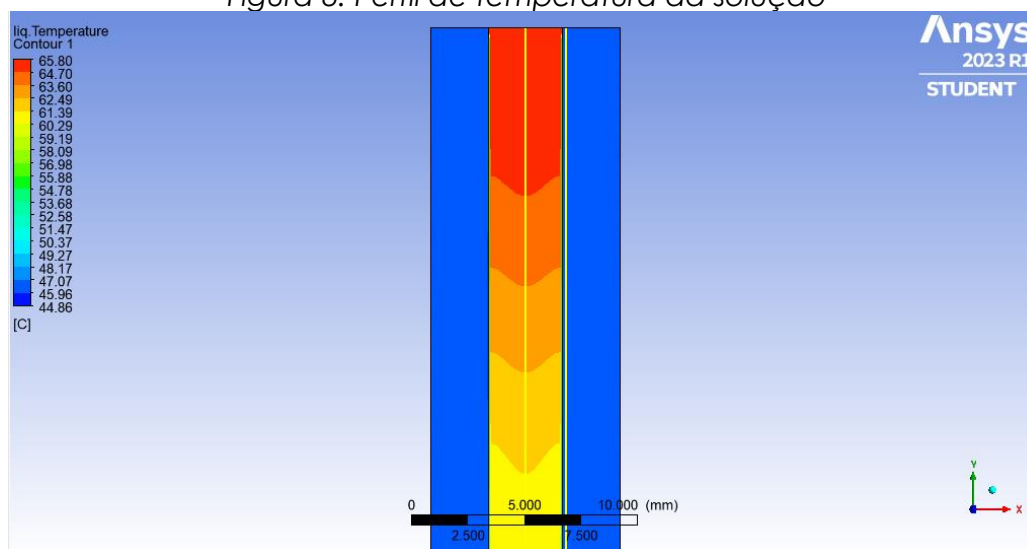
Pode ser visualizado na figura 7, que há uma redução na temperatura do vapor refrigerante (T_v) e um aumento da temperatura do absorvente (T_l) no período de estabilização do processo. Esse comportamento favorece o processo de refrigeração já que o torna mais eficiente, e permite atingir

temperaturas mais baixas de evaporação, e portanto, temperaturas menores no circuito de água gelada. Desse modo, é possível considerar o comportamento constante da temperatura dos fluidos como uma possível alternativa na busca de melhoria de desempenho do absorvedor através da variação da vazão dos fluidos, da fração mássica, assim como também da geometria do trocador de calor.

Quanto ao comportamento da temperatura do absorvente no trocador de calor, há uma mudança de comportamento na região de troca (Figura 8) que está relacionada à temperatura do vapor refrigerante (Figura 9) que está no trocador de calor.

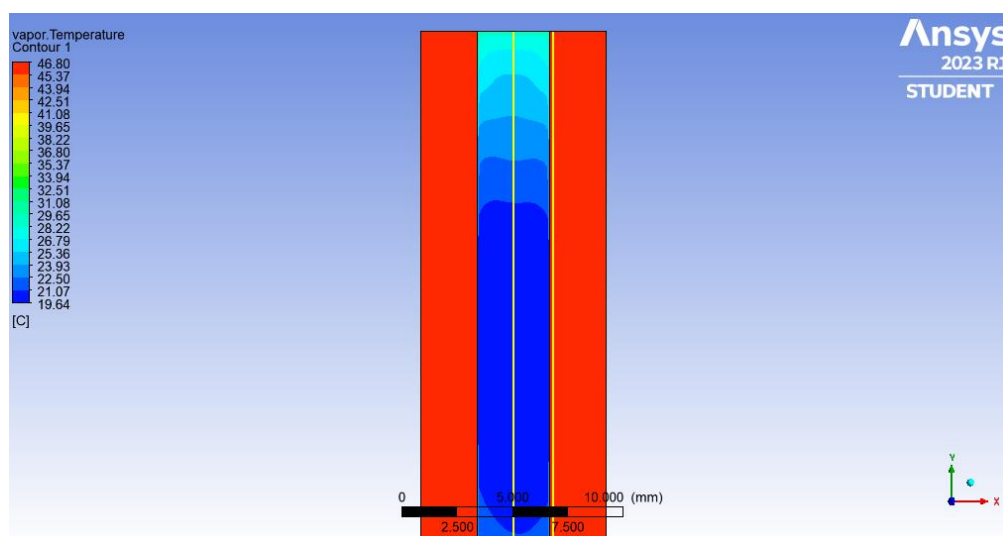
A figura 9 é simétrica e é possível observar que as temperaturas mais baixas se concentram no centro do trocador, enquanto a área mais externa mantém-se entre os 26 e 29°C. Essa distribuição de temperatura apresenta uma troca térmica maior entre os fluidos no centro do equipamento e temperatura mais altas nas proximidades das paredes do trocador.

Figura 8: Perfil de temperatura da solução



Ao entender a simetria da figura 9, é possível observar que a mesma complementa o fenômeno observado na figura 7, ou seja, a temperatura reduz até 19°C, a qual pode ser menor em função da faixa de simulação, mantendo-se estável em aproximadamente 21°C até parar totalmente a troca de calor e voltar à temperatura ambiente, 27°C. Esse último processo ocorre um pouco antes da metade do comprimento da geometria, em aproximadamente 215 mm.

Figura 9: Perfil de temperatura do calor



5 CONCLUSÕES

Neste trabalho um modelo numérico de transferência de calor e massa baseado na dinâmica de fluido computacional foi desenvolvido fornecendo resultados coerentes com os valores experimentais. Foi possível entender o funcionamento dos sistemas de refrigeração por absorção com o par amônia-água, assim como realizar uma análise de sensibilidade do absorvedor verificando variações na geometria. Entre os resultados mais relevantes tem-se que:

- A distribuição de temperatura apresenta uma transferência de calor maior entre os fluidos no centro do equipamento e temperatura mais altas nas proximidades das paredes do trocador.
- A troca de calor dos fluidos refrigerante, absorvente e de arrefecimento se estabiliza aproximadamente em 210 mm percorridos, o que indica uma possibilidade de otimização da geometria do trocador de calor.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFPE pela disponibilidade dos laboratórios e a licença computacional do ANSYS. Os autores agradecem à FACEPE pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa - APQ-0151-3.05/14. O segundo autor também agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade nº 303417/2022-6.

REFERÊNCIAS

- Alcântara, S.C.S., Ochoa, A.A.V., da Costa, J.A.P., Michima, P.S.A., Silva, H.C.N., 2019. Natural gas based trigeneration system proposal to an ice cream factory: An energetic and economic assessment. *Energy Convers. Manag.* 197. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111860>
- Bo, S., Ma, X., Lan, Z., Chen, J., Chen, H., 2010. Numerical simulation on the falling film absorption process in a counter-flow absorber. *Chem. Eng. J.* 156, 607–612. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.04.066>
- Keith E. Herold, Reinhard Radermacher, S.A.K., 2016. *Absorption Chillers and*

- Heat Pumps, CRC Press Taylor & Francis Group.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Lima, Soares, A.A., 2018. ANÁLISE NUMÉRICA DE ABSORVEDORES DE CHILLER DE ABSORÇÃO DO TIPO PLACA UTILIZANDO AMÔNIA/ÁGUA COMO FLUIDO DE TRABALHO VIA CFD. Federal University of Pernambuco - UFPE.
- Lima, Soares, A.A., 2016. MODELO E ANÁLISE DO PROCESSO DE ABSORÇÃO NUMA SOLUÇÃO DE AMONIA-ÁGUA PARA APLICAÇÕES EM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO. Trab. conclusão Curso. Federal University of Pernambuco - UFPE. <https://doi.org/10.1590/s0102-33061996000200016>
- Lima, A.A., Ochoa, A.A., Da Costa, J.A., Henríquez, J., 2019. CFD simulation of heat and mass transfer in an absorber that uses the pair ammonia/water as a working fluid. *Int. J. Refrig.* 98, 514–525.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.11.010>
- Prata, J.E., 2012. MODELAGEM DE UM ABSORVEDOR DE FILME DESCENDENTE LÍQUIDO PARA UM CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO AMÔNIA-ÁGUA. Trab. Conclusão Curso. Feral University of São Paulo - USP
- Ochoa, A.A.V., Dutra, J.C.C., Guerrero, J.R.H., 2011. Introdução a análise de sistemas de refrigeração por absorção 227.
- Ochoa, A.A.V., Dutra, J.C.C., Henríquez, J.R.G., Dos Santos, C.A.C., 2016. Dynamic study of a single effect absorption chiller using the pair LiBr/H₂O. *Energy Convers. Manag.* 108.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.009>
- Ochoa, A.A.V., Dutra, J.C.C., Henríquez, J.R.G., dos Santos, C.A.C., Rohatgi, J., 2017. The influence of the overall heat transfer coefficients in the dynamic behavior of a single effect absorption chiller using the pair LiBr/H₂O. *Energy Convers. Manag.* 136.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.020>
- Villa, A.A.O., da Costa, J.Â.P., dos Santos, C.A.C., 2018. Energetic analysis using theoretical modeling and the characteristic equation method in a small absorption chiller with lib/H₂O. *Acta Sci. - Technol.* 40, 1–10.
<https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v40i1.34969>