CADERNOS UniFOA 20 ANOS
Edição 56 | 2026
e-ISSN: 1982-1816
Data de submissão: 07/08/2025 Data de Aprovação: 12/05/2026

Simulação do desempenho térmico do evaporador de um FHPHE em fluxo paralelo

Simulation of the thermal performance of a parallel-flow FHPHE evaporator.

[1] Felipe Lima Fernandes da Silva
[1] Gabriel José Braga Arvellos dos Santos
[1] Yuri Gabriel Viana Silva
[1] Diniz Felix dos Santos
[1] Camila Martins Hosken

1 Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ, Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise térmica teórica e a simulação do evaporador de um trocador de calor de tubos de calor axialmente aletados (FHPHE) operando em configuração de fluxo paralelo, concepção inédita na literatura. A pesquisa se justifica pela busca de alta eficiência térmica em sistemas de ar-condicionado, avaliando se o fluxo paralelo supera as limitações das configurações convencionais de fluxo cruzado. O objetivo central é analisar o desempenho térmico do protótipo por meio do Método da Eficiência Térmica e simulações analíticas. A metodologia consistiu na modelagem de duas concepções de FHPHE, utilizando o *software Fortran Power Station* para calcular variáveis, como coeficiente global de transferência de calor, efetividade térmica e taxa de transferência de calor, sob diferentes vazões mássicas e temperaturas de entrada. Os resultados demonstram que o dispositivo apresenta desempenho térmico excepcional, com efetividade, atingindo 0,99 em baixas vazões, superando trocadores de fluxo cruzado tradicionais. Conclui-se que, embora a capacidade de troca térmica seja elevada, as concepções de entrada e saída de ar geram irreversibilidades viscosas significativas. Assim, o estudo aponta a necessidade de otimização da solução física para minimizar perdas e garantir a viabilidade econômica do sistema.

Palavras-chave:

Trocador de calor. FHPHE. efetividade térmica. análise térmica. simulação analítica.

ABSTRACT

This work presents a theoretical thermal analysis and simulation of the evaporator of an axially finned heat pipe (AFP) heat exchanger operating in a parallel flow configuration, a novel design in the literature. The research is justified by the pursuit of high thermal efficiency in air conditioning systems, evaluating whether parallel flow overcomes the limitations of conventional cross-flow configurations. The central objective is to analyze the thermal performance of the prototype using the Thermal Efficiency Method and analytical simulations. The methodology consisted of modeling two AFP designs using Fortran Power Station software to calculate variables such as the overall heat transfer coefficient, thermal effectiveness, and heat transfer rate, under different mass flow rates and inlet temperatures. The results demonstrate that the device exhibits exceptional thermal performance, with effectiveness reaching 0.99 at low flow rates, surpassing traditional cross-flow heat exchangers. It is concluded that, although the heat exchange capacity is high, the air inlet and outlet designs generate significant viscous irreversibilities. Thus, the study points to the need to optimize the physical solution to minimize losses and ensure the economic viability of the system.

Keywords:

Heat exchanger. FHPH. Thermal effectiveness. Thermal analysis. Analytical simulation.

CC BY NC SA

1 INTRODUÇÃO

O presente estudo realiza uma análise térmica teórica do evaporador de um trocador de calor de tubos de calor axialmente aletados (FHPHE), operando em uma configuração de fluxo paralelo inédita na literatura. A investigação utiliza o Método da Eficiência Térmica, abordagem consolidada na análise de sistemas de troca de calor para avaliação de desempenho.

Atualmente, o desenvolvimento de FHPHEs é objeto de estudo de diversos grupos de pesquisa internacionais, visando otimizar a transferência de calor tanto em modelos teóricos quanto experimentais. A versatilidade tecnológica desses dispositivos permite uma ampla gama de aplicações, com destaque para sistemas de ar-condicionado em ambientes críticos, como salas cirúrgicas. Tais locais demandam controle rigoroso de variáveis, como temperatura, vazão de ar, umidade relativa e taxas de renovação.

No contexto brasileiro, normas técnicas definem que o ar em salas cirúrgicas deve ser mantido entre 18 ºC e 22 ºC, com áreas padronizadas de 20, 30 e 40 m². O emprego de FHPHEs surge como uma alternativa para atender a esses parâmetros com alta eficiência. A seguir, apresenta-se uma síntese dos principais trabalhos teórico-experimentais sobre FHPHE disponíveis na literatura científica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONTEXTO

Barrak (2021) relata que o consumo de energia em países tropicais deve aumentar a uma taxa maior do que em outros países e que a recuperação de energia é uma das alternativas para melhorar o desempenho térmico. O autor afirma que as unidades de ar-condicionado e seu custo elétrico representam metade do valor das contas de energia, destacando que sistemas de recuperação de energia podem reduzir esse alto custo. Barrak (2021) também defende que os tubos de calor funcionando como trocadores de calor são uma excelente alternativa para recuperação de energia, podendo ainda melhorar a qualidade do ar fresco, ao reduzir a umidade relativa em 10%.

2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nogueira (2020) apresenta uma revisão detalhada dos conceitos de irreversibilidades térmicas e viscosas aplicados à análise de trocadores de calor, introduzindo a metodologia baseada na eficiência térmica e na "Analogia de Aletas". O autor fundamenta sua abordagem na Segunda Lei da Termodinâmica e no número de Bejan, desenvolvendo o "Método da Eficiência Térmica" como ferramenta analítica para determinação de grandezas termodinâmicas relevantes, incluindo a eficácia térmica e as irreversibilidades do sistema.

O autor (2025) avança no desenvolvimento teórico através de uma modelagem analítica adimensional unificada, aplicável a diversas configurações de trocadores de calor utilizados na indústria. A metodologia proposta permite a caracterização da eficiência térmica tanto do equipamento completo quanto dos componentes individuais, como as aletas, estabelecendo parâmetros de comparação com trocadores ideais baseados nos princípios fundamentais da termodinâmica.

Jouhara *et al.* (2017) conduzem uma extensa revisão bibliográfica sobre tubos de calor, investigando sistematicamente suas aplicações em diferentes regimes de temperatura, materiais construtivos disponíveis e desempenho operacional. O estudo organiza as aplicações em categorias específicas, incluindo sistemas de energia solar, aplicações com nanopartículas e implementações automotivas, além de apresentar uma análise crítica das limitações atuais e perspectivas futuras de desenvolvimento.

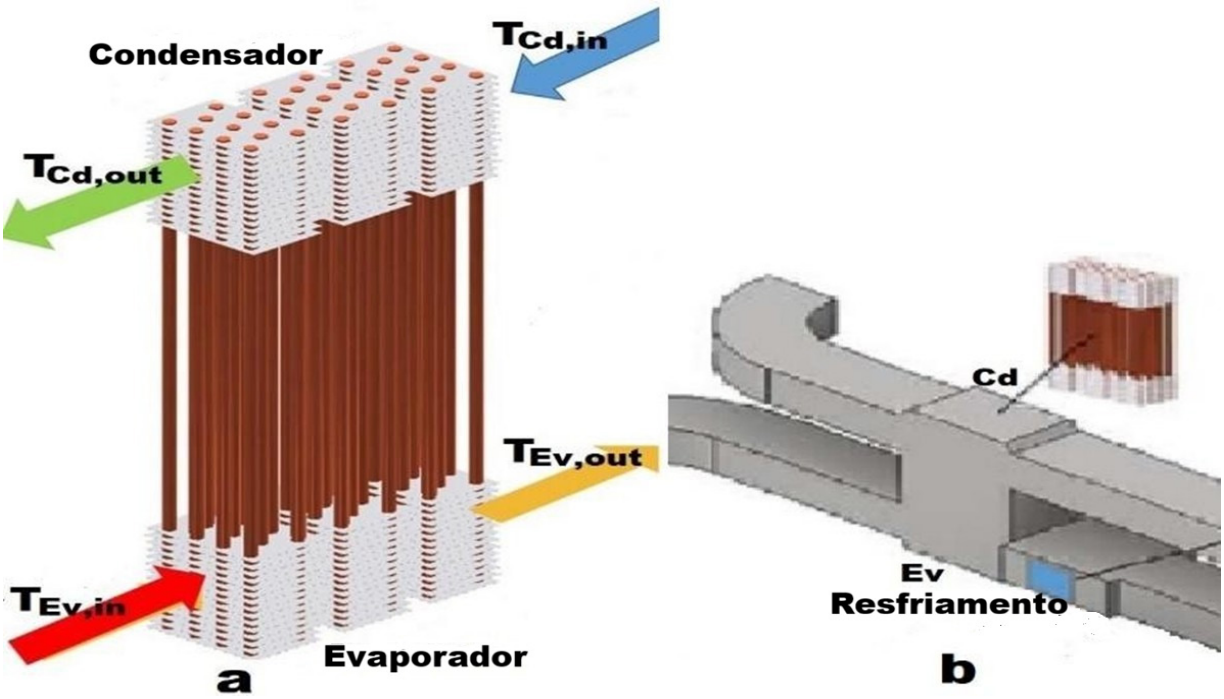
Barrak (2021) caracteriza os tubos de calor como dispositivos passivos de alta eficiência para transferência de calor, estabelecendo uma classificação sistemática que inclui as configurações tradicionais, termossifão e oscilante (OHP). O autor destaca as vantagens operacionais desses dispositivos, mas ressalta que os mecanismos físicos envolvidos na operação dos tubos oscilantes ainda representam um desafio para a compreensão científica completa.

2.3 DESENVOLVIMENTO

Sukarno, *et al.* (2021) desenvolveram um sistema experimental de HVAC para sala cirúrgica, analisando a eficiência energética e recuperação de calor em um trocador de calor de tubo de calor com aletas em fluxo cruzado (FHPHE). O sistema empregou configuração escalonada com três, seis e nove fileiras de quatro tubos, sob temperaturas de entrada de ar entre 30°C e 45°C. Além da análise experimental, os autores aplicaram o método de eficácia térmica (ε-NTU), obtendo eficácia máxima de 62,7% a 45°C com 36 tubos (nove fileiras), concluindo que o método ε-NTU é adequado para análise de recuperação energética em sistemas de ar-condicionado e que o uso de tubos de calor melhora a eficiência e reduz emissões.

O trocador de calor possui três conjuntos de 12 tubos cada, organizados em três fileiras de quatro tubos, conforme representado a abaixo (Figura 1) (Sukarno *et al.*, 2021).

Figura 1 – Representação do conjunto de tubos de calor com aletas radiais e representação do evaporador (pré- resfriamento), resfriamento convencional, condensador (recuperação de energia) e tubos de circulação de ar



Fonte: Sukarno *et al.* (2021)

O ar fresco aquecido ingressa na seção de evaporação (pré-resfriamento) e em um trocador convencional para manter a temperatura da sala entre 20°C e 25°C. O ar é extraído por dutos contendo o condensador (recuperação de energia). Para atender aos requisitos de salas cirúrgicas, o ar deve ser isento de contaminantes e renovado 20 a 25 vezes por hora, com temperatura de entrada de 30°C a 45°C e vazão de 0,050 kg/s

a 0,095 kg/s. A temperatura de saturação do fluido não foi especificada, mas dados experimentais indicam valores entre 26°C e 28°C.

Quanto às aletas, o espaçamento de 2,0 mm resultou em 77 aletas no evaporador e 96 no condensador, indicando superdimensionamento. Embora tenha melhorado o desempenho térmico, o excesso de aletas aumentou significativamente a dissipação viscosa, comprometendo a viabilidade custo-efetividade do projeto.

Hakim, Sukarno e Putra (2021) investigaram um sistema HVAC com trocador de calor de aletas em U, analisando processos de aquecimento e resfriamento em configurações de uma e duas fileiras com oito tubos cada. Verificou-se que a configuração de duas fileiras impacta mais significativamente o pré-resfriamento e reaquecimento, sendo o tubo de calor em U uma solução promissora para sistemas que demandam resfriamento e aquecimento sequenciais.

Putra, Anggoro e Winarta (2017) realizaram estudo experimental com tubos de calor aletados para recuperação de calor de ar exaurido em ambiente. O sistema, com seis fileiras de tubos de 13 mm de diâmetro e 700 mm de comprimento, usando água como fluido, mostrou que maiores temperaturas de entrada elevam o desempenho do HPHE e a capacidade de resfriamento. A análise econômica apontou redução no consumo energético entre 0,6 e 4,1 GJ/ano para operação contínua.

Jouhara *et al.* (2021) conduziram pesquisa teórico-experimental sobre trocador de calor de tubo de calor multipasso para aquecimento de água com ar quente. Investigou-se o efeito do número de Reynolds em defletores e variação de vazão, constatando influência significativa no desempenho térmico. Os autores utilizaram os modelos LMTD e ε-NTU para prever o comportamento global do equipamento e destacaram a relevância de trocadores de calor na recuperação de energia residual.

2.4 APLICAÇÕES

Górecki *et al.* (2021),\ desenvolveram um trocador de calor com tubos de calor aletados para pequenos sistemas de ar-condicionado usando R404A. Com arranjo de 20 fileiras, alcançou 60% de eficácia térmica, com apenas 10% de divergência entre dados teóricos e experimentais após otimização de perdas de pressão. Os autores afirmam que tubos de calor com aletas individuais são superiores aos convencionais por suportarem maiores pressões, terem menor tendência à deformação e facilitarem manutenção.

2.5 VALIDAÇÃO

Nogueira (2023) aplicou o "Método da Eficiência Térmica" para análise localizada de desempenho térmico em trocadores de calor com tubos de calor aletados, visando melhorar a eficiência energética de sistemas de ar-condicionado. O estudo considerou número de aletas, tubos, temperaturas e vazões, utilizando Freon 404A para resfriamento no evaporador e recuperação de energia no condensador. O modelo foi aplicado separadamente ao evaporador, condensador e ao trocador completo.

A comparação entre resultados de simulação – incluindo velocidade do ar, Nusselt, eficácia térmica, taxa de transferência de calor e temperatura de saída – e dados experimentais globais mostraram excelente concordância, validando o método localizado como ferramenta analítica confiável para trocadores de calor com tubos de calor.

2.6 OTIMIZAÇÃO

Nogueira (2023) apresenta que o erro absoluto máximo para a eficácia é de 58,9% e o erro absoluto mínimo é de 2,2%. O erro absoluto máximo para a taxa de transferência de calor é de 41,4% e o erro absoluto mínimo é de 0,9%.

3 METODOLOGIA

Na 1ª etapa, foi realizada a definição formal do escopo do projeto, estabelecendo os objetivos, a metodologia de execução e os recursos necessários para o desenvolvimento do trocador de calor de tubos de calor axialmente aletados. Na 2ª etapa, procedeu-se com um levantamento bibliográfico abrangente, consolidando trabalhos da literatura e resultados prévios associados ao tema. Na 3ª etapa, estabeleceu-se a fundamentação teórica sobre transferência de calor e escoamento, abordando os métodos da DTML (Diferença de Temperatura Média Logarítmica), -NUT (Número de Unidades de Transferência) e Eficiência Térmica.

Na 4ª etapa, foram realizadas análises comparativas de estudos relacionados a esses métodos e a trocadores de calor em fluxo cruzado, consolidando a base conceitual necessária para o desenvolvimento do modelo. Na 5ª etapa, validou-se o domínio técnico dos conceitos fundamentais necessários para a aplicação prática nas disciplinas correlatas. Na 6ª etapa, iniciou-se a fase de formulação e design do trocador, integrando a teoria específica de tubos de calor axialmente aletados ao projeto.

Na 7ª etapa, desenvolveu-se progressivamente o projeto, por meio de modelagem sistemática e análise de resultados parciais do design do trocador. Na 8ª etapa, realizou-se a avaliação técnica dos resultados obtidos em relação ao FHPHE para refinamento do modelo. Na 9ª etapa, procedeu-se à definição final da geometria e parâmetros do protótipo com base nas análises de viabilidade térmica realizadas.

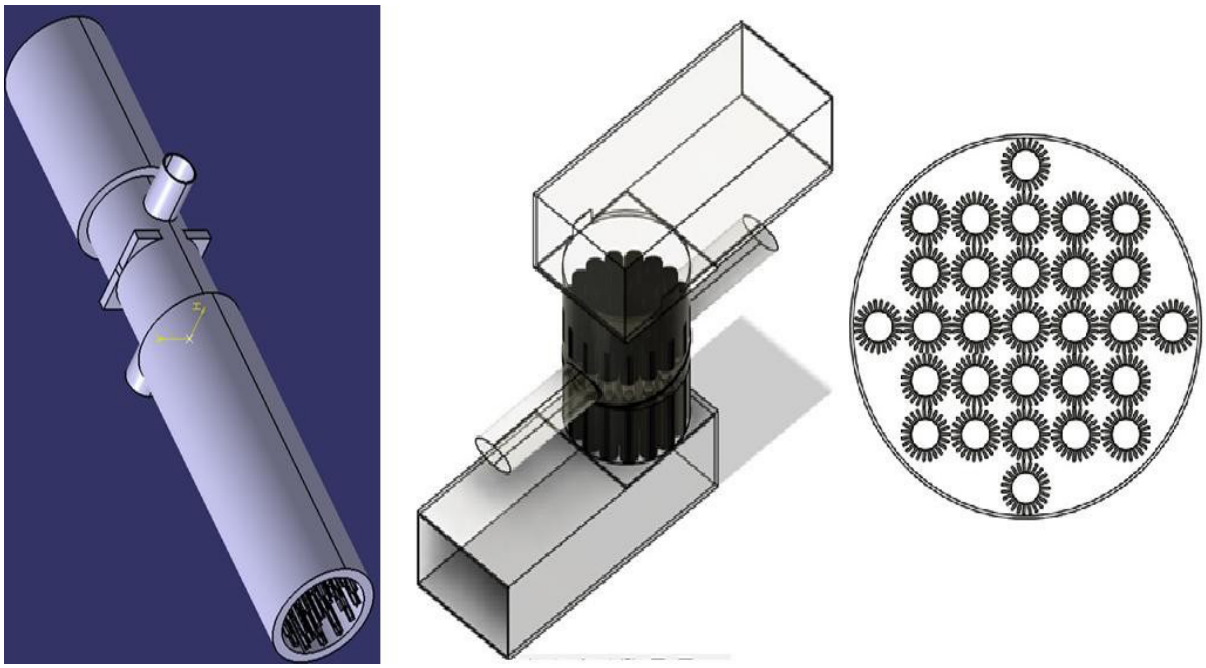
Na 10ª etapa, configurou-se o *software Fortran Power Station*, estabelecendo os parâmetros e rotinas necessárias para a simulação computacional. Na 11ª etapa, executou-se a simulação computacional do protótipo com 29 tubos de calor, com obtenção de resultados numéricos e gráficos. Na 12ª etapa, os resultados gráficos foram consolidados e validados tecnicamente para a composição final do estudo.

Na 13ª etapa, realizou-se a qualificação final da pesquisa, com a compilação do relatório técnico completo, garantindo a documentação e transparência de todo o processo de desenvolvimento e simulação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta as concepções do trocador de calor de tubos axialmente aletados em fluxo paralelo no evaporador e contrafluxo no condensador, incluindo a disposição radial de 29 tubos de calor.

Figura 2 – Concepções do trocador de calor de tubos axialmente aletados, detalhando o fluxo paralelo no evaporador, o contrafluxo no condensador e a disposição radial de 29 tubos de calor.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os parâmetros relacionados com o trocador de calor, utilizados para obtenção de resultados gráficos e numéricos, encontram-se abaixo especificados.

Os parâmetros relacionados com a configuração física do trocador de calor são: o comprimento do evaporador (LEv); o comprimento do condensador (LCd); o comprimento da seção adiabática (LAd); o número de aletas por tubo ($NFin$); a altura das aletas ($LFin$); espaço entre aletas ($EspFin$); taxa de enchimento do fluido de trabalho no evaporador (X); o volume do evaporador (VEv); a temperatura de saturação do fluido de trabalho ($Tsat$).

$$L_{Ev} = 220\ mm;$$

$$L_{Cd} = 100\ mm;$$

$$L_{Ad} = 120\ mm;$$

$$N_{Fin} = 23;$$

$$L_{Fin} = 18\ mm;$$

$$X = 100\%;$$

$$T_{sat} = 27°C.$$

Os parâmetros de entrada e saída relacionados com o ar que é resfriado no evaporador são especificados por faixas de valores a saber: temperatura de entrada do ar no evaporador ($Tairin$); vazão em massa do ar ($m\cdot air$).

$$T_{airin} = 28°C\ a\ 45°C; \dot{m}_{air} = 0.01\frac{kg}{s}\ a\ 0.15\frac{kg}{s}$$

Algumas das grandezas geométricas especificadas encontram-se representadas abaixo (Quadro 1).

Quadro 1- Especificações de grandezas geométricas associadas ao FHPHE em análise

ITEM	TAMANHO (mm)
Largura Evaporador	220,00
Largura Zona Adiabática	100,00
Largura Condensador	120,00
Diâmetro Casco	613,8
Diâmetro Externo (Tubo)	51,69
Diâmetro Interno (Tubo)	50,80
Largura Total	440,00
Altura Aleta	18,00
Espaço entre Aletas	3,25
Espessura das Aletas	4,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os resultados numéricos foram obtidos através de simulação analítica, em primeira aproximação, efetuada através do *Software Power Station* instalado no laboratório 17 do Prédio da Engenharia do UniFOA. Os autores obtiveram os resultados numéricos variando as grandezas de entrada, a partir das condições de entrada especificadas acima.

As grandezas físicas obtidas através de simulações analíticas são especificadas através dos seguintes símbolos: velocidade média do ar na região do evaporador ($Vair$); coeficiente global de transferência de calor no evaporador (UEv); número de unidades térmicas no evaporador ($NTUEv$); número de Nusselt no evaporador ($NuEv$); eficiência térmica no evaporador (σEv); efetividade térmica no evaporador (εEv); taxa de transferência de calor no evaporador (QEv); temperatura de saída do ar no evaporador ($Tairout$). Alguns dos resultados numéricos obtidos encontram-se representados abaixo (Quadro 2).

Quadro 2 – Resultados numéricos obtidos para faixas de temperatura de entrada e vazões do ar

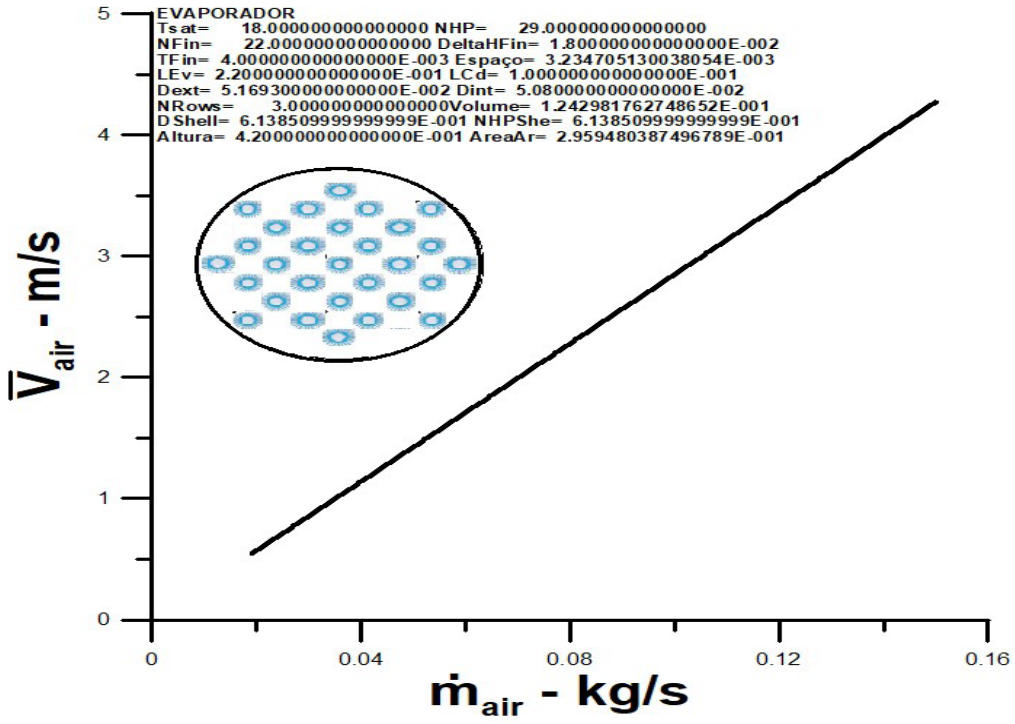
Temperatura de Entrada (°C)	Vazão (Kg/s)	Efetividade	NTU	Velocidade (m/s)	Nusselt	Temperatura de Saída (°C)	Taxa de Transferência (W)	Coeficiente Global de Troca (W/m²K)
30,1	0,0190	0,9975	5,9871	0,5258	32,7538	27,0078	59,0917	16,8797
30,1	0,0750	0,9505	3,0064	2,0755	65,0752	27,1534	222,2751	33,4577
30,1	0,1500	0,8802	2,1216	4,1511	92,0303	27,3715	411,6426	47,2236
35,1	0,0190	0,9976	6,0441	0,5308	32,5877	27,0192	154,4762	17,0464
35,1	0,0750	0,9522	3,0411	2,0953	64,7453	27,3870	582,0184	33,8562
35,1	0,1500	0,8835	2,1498	4,1905	91,5636	27,9437	1080,0187	47,8661
40,1	0,0190	0,9977	6,0894	0,5359	32,4224	27,0297	249,9464	17,1802
40,1	0,0750	0,9533	3,0645	2,1154	64,4169	27,6115	942,7131	34,1285
40,1	0,1500	0,8854	2,1666	4,2307	91,0992	28,5008	1751,1699	48,2589
45,1	0,0190	0,9978	6,1332	0,5411	32,2580	27,0393	345,5030	17,3099
45,1	0,0750	0,9543	3,0867	2,1359	64,0902	27,8263	1304,3934	34,3879
45,1	0,1500	0,8872	2,1824	4,2717	90,6372	29,0411	2425,3255	48,6279

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os resultados numéricos apresentados no do Quadro 5 serão analisados e discutidos em função dos resultados gráficos representativos abaixo.

O Gráfico 1 apresenta resultados para a velocidade do ar no interior do trocador de calor, em função da vazão em massa do ar. Como é de se esperar, a velocidade aumenta com o aumento da vazão, alcançando um valor máximo próximo de 5.0 metros por segundo para uma vazão igual a 0.15 kg/s. Algumas das dimensões relacionadas com a configuração analisada (em destaque) também se encontram representadas.

Gráfico 1 – Velocidade do ar no interior do trocador de calor e configuração radial em análise



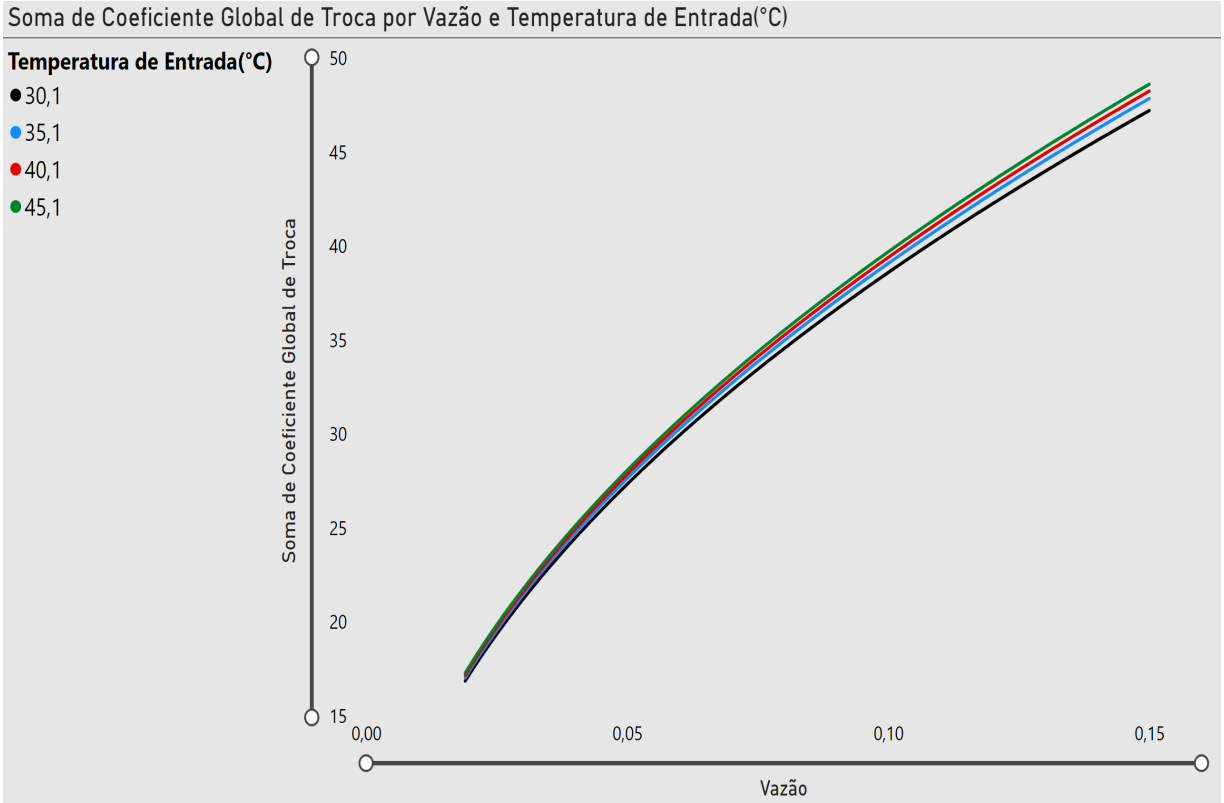
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os resultados gráficos apresentados pelos autores encontram-se representados nos gráficos abaixo (Gráfico 2, 3, 4, 5, 6 e 7), utilizando valores de temperatura como parâmetros de entrada. Os valores de temperatura de entrada usados para análise foram: 30.1ºC, 35.1ºC, 40.1ºC e 45.1ºC.

O coeficiente global de transferência de calor, representado pelo Gráfico 2, varia significativamente com a vazão de ar, e apresenta, como esperado, variação sensível em relação à variação da temperatura de entrada do ar para vazões de ar elevadas. É de se esperar que essa variação com a temperatura se reflita em outras grandezas térmicas de interesse.

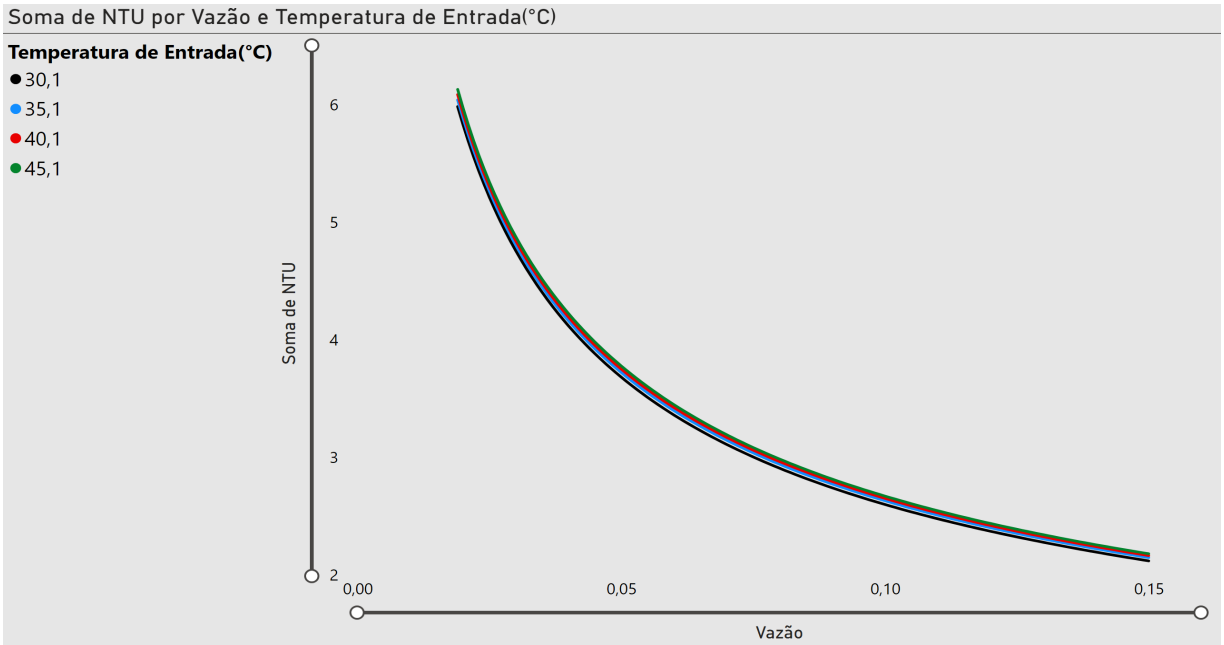
O Gráfico 3 apresenta resultados de variação para o número de unidades térmicas em função da vazão de ar. De forma equivalente ao coeficiente de transferência de calor, há grande variação relacionada com a variação na vazão do ar, e variação sensível à variação na temperatura de entrada do ar.

Gráfico 2 – Coeficiente global de transferência de calor no evaporador versus vazão em massa do ar



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

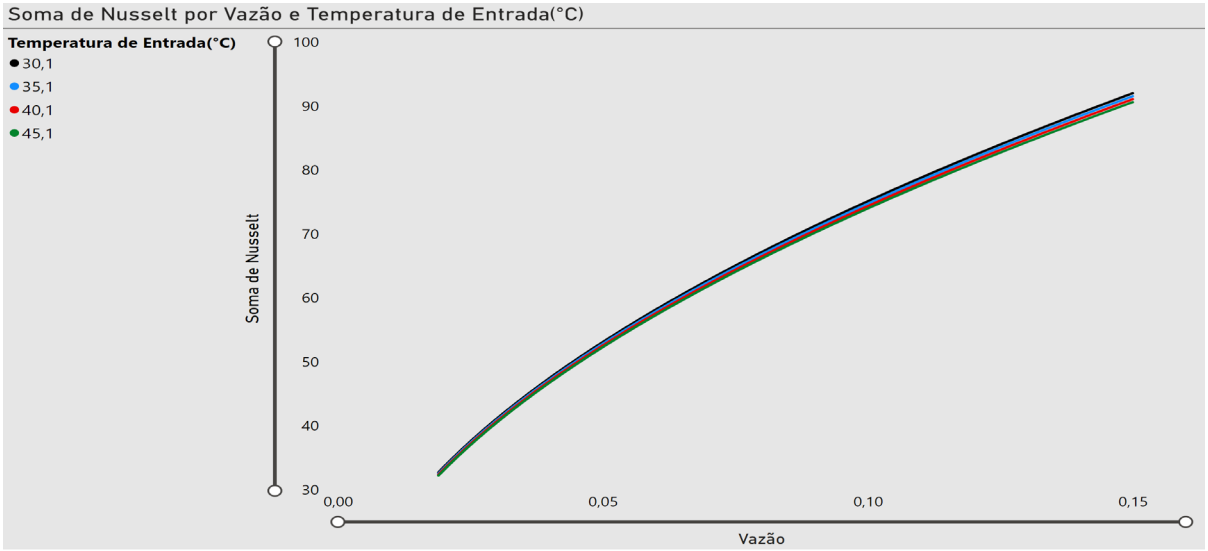
Gráfico 3 – Número de unidades térmicas no evaporador versus vazão em massa do ar



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Resultados para número de Nusselt se encontram representados no Gráfico 4. O número de Nusselt cresce significativamente com o aumento da vazão e sofre ligeira alteração em relação à variação de temperatura, decaindo com o aumento da temperatura.

Gráfico 4 – Número de Nusselt no evaporador versus vazão em massa do ar

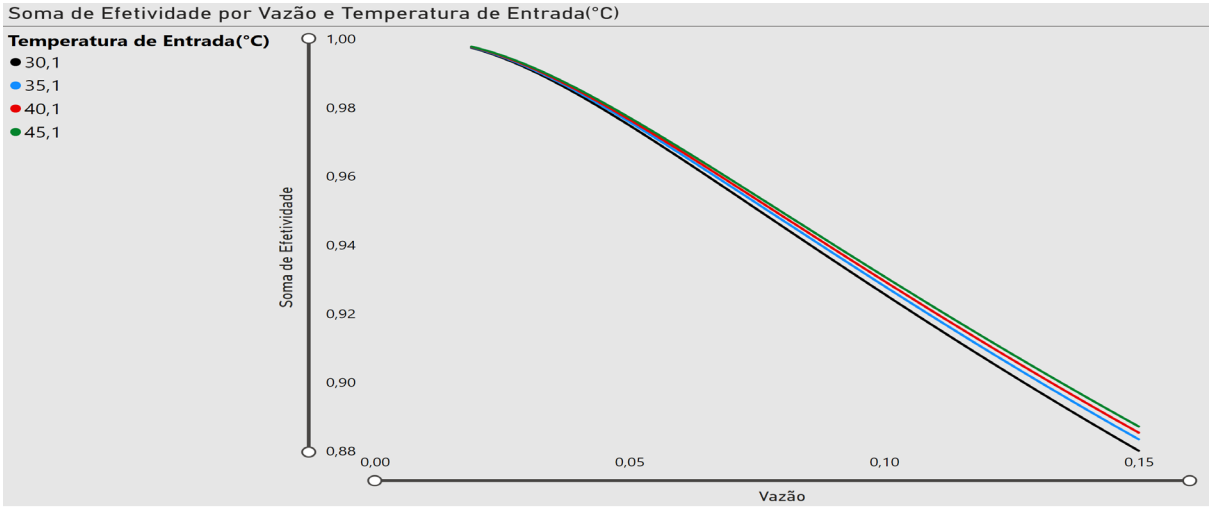


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Uma das principais grandezas térmicas de interesse se encontra representada no Gráfico 5. A efetividade térmica apresenta significativa variação com relação à vazão de ar e com a variação de temperatura de entrada do ar, decrescendo com o aumento da vazão e crescendo com o aumento da temperatura. O que é notável é o valor numérico obtido para a efetividade, que demonstra altíssimo desempenho térmico para a configuração do trocador de calor, em toda faixa de vazão de ar analisada.

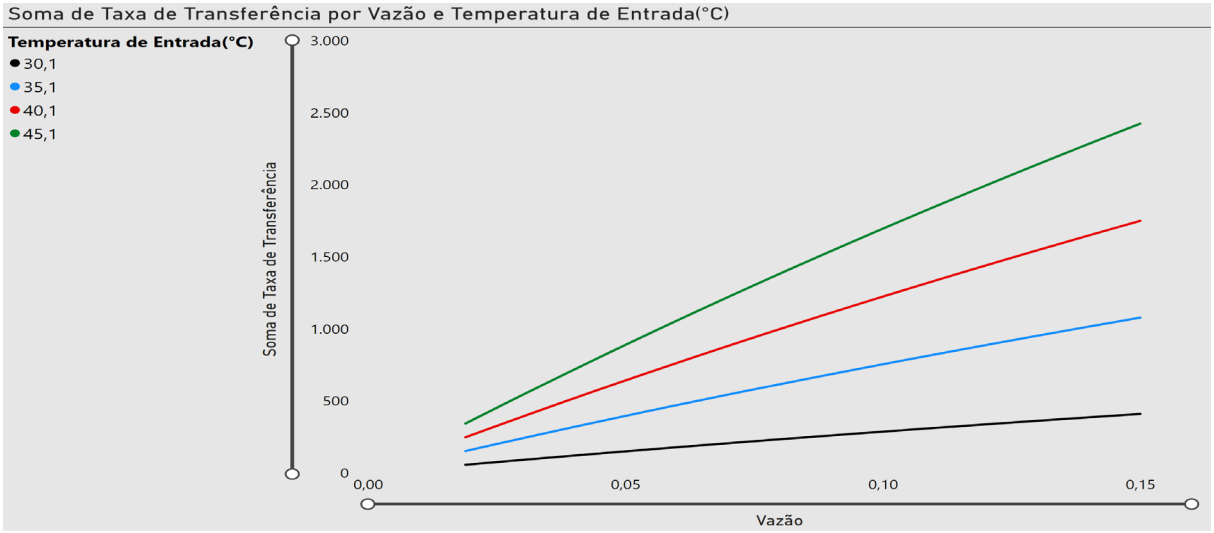
A taxa de transferência de calor (Gráfico 6) reflete a variação obtida para a efetividade térmica, mas com grande variação em relação à temperatura de entrada do ar. Como esperado, quanto maior a diferença do potencial térmico (diferença de temperatura entrada do ar e temperatura de saturação do fluido de trabalho), maior a taxa de transferência de calor entre os meios.

Gráfico 5 – Efetividade térmica no evaporador versus vazão em massa do ar



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

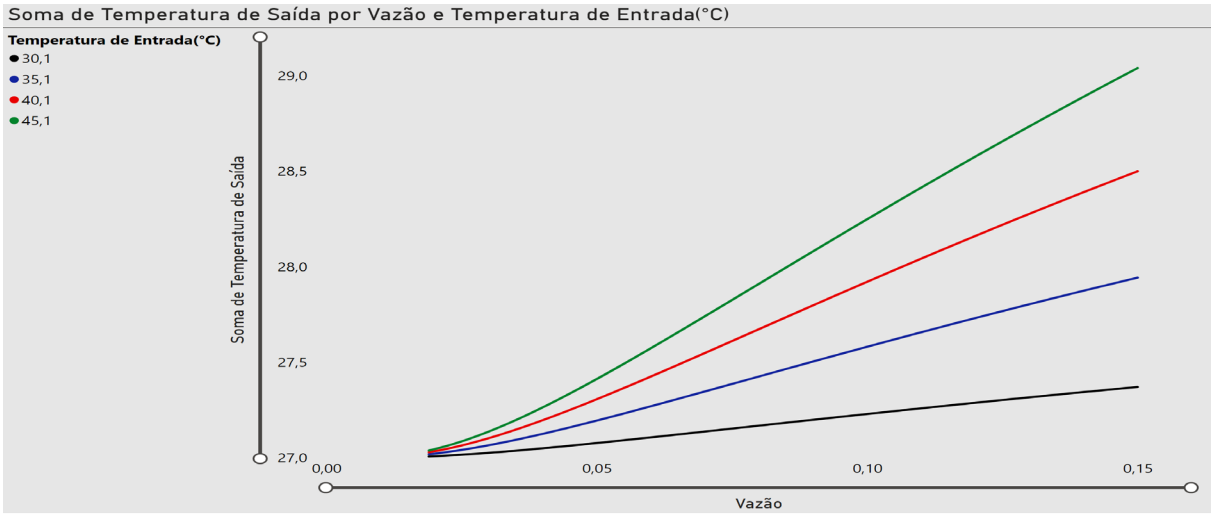
Gráfico 6 –Taxa de transferência de calor no evaporador versus vazão em massa do ar



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

O resultado mais importante, dentro do contexto relacionado com o trocador de calor no evaporador, encontra-se representado no Gráfico 7. A temperatura de saída do ar encontra-se abaixo de 29ºC para todas as temperaturas de entrada e vazões de ar em análise.

Gráfico 7 – Temperatura de saída do ar no evaporador versus vazão em massa do ar



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

5 CONCLUSÃO

A análise térmica teórica do evaporador do FHPHE em fluxo paralelo validou a eficácia dessa configuração inédita, apresentando um desempenho térmico superior aos modelos de fluxo cruzado convencionais. Os resultados da simulação demonstraram que o sistema mantém a temperatura de saída do ar abaixo de 29 °C em todos os cenários testados, com uma efetividade térmica variando entre 0,88 e 0,99. Tais valores confirmam o potencial da tecnologia para aplicações rigorosas, como o condicionamento de ar em salas cirúrgicas.

Contudo, a viabilidade prática do modelo atual requer o enfrentamento de limitações identificadas na concepção física:

1. Otimização do Balanço de Energia: é necessário evoluir o modelo global para uma análise segmentada, permitindo mapear a variação de temperatura longitudinal ao longo da parede do trocador;

2. Taxa de Enchimento: futuras simulações devem abandonar a premissa de 100% de enchimento, incorporando o impacto da variação do nível do fluido na temperatura de saturação real;

3. Eficiência Global e Dissipação Viscosa: o alto desempenho térmico deve ser confrontado com a dissipação viscosa. As configurações atuais de entrada e saída de ar mostram-se desfavoráveis, gerando irreversibilidades que elevam a perda de carga.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação do Número de Bejan como parâmetro de otimização para equilibrar a transferência de calor e as perdas viscosas. Além disso, a inclusão das seções adiabática e do condensador na modelagem permitirá uma avaliação precisa da eficiência global do trocador de calor.

REFERÊNCIAS

BARRAK, A. Heat pipes heat exchanger for HVAC applications. In: Heat Transfer – Design, Experimentation, and Applications. IntechOpen, 2021. DOI: 10.5772/intechopen.95530. Acesso em: 17 jul. 2025.

BEJAN, A. The thermodynamic design of heat and mass transfer processes and devices. Heat and Fluid Flow, v. 8, n. 4, p. 258-276, 1987. DOI: https://doi.org/10.1016/0142-727X(87)90062-2. Acesso em: 17 jul. 2025.

FAKHERI, A. Heat exchanger efficiency. Transactions of the ASME, v. 129, p. 1268-1276, 2007. DOI: 10.18488/65.v9i1.3130. Acesso em: 17 jul. 2025.

GÓRECKI, G.; ŁĘCKI, M.; GUTKOWSKI, A. N.; ANDRZEJEWSKI, D.; WARWAS, B.; KOWALCZYK, M.; ROMANIAK, A. Experimental and numerical study of heat pipe heat exchanger with individually finned heat pipes. Energies, v. 14, p. 5317, 2021. DOI: 10.3390/en14175317. Acesso em: 17 jul. 2025.

HAKIM, I. I.; SUKARNO, R.; PUTRA, N. Utilization of U-shaped finned heat pipe heat exchanger in energy-efficient HVAC systems. Thermal Science and Engineering Progress, 2021. DOI: 10.1016/j.tsep.2021.100984. Acesso em: 17 jul. 2025.

JOUHARA, H.; ALMAHMOUD, S.; BROUGH, D.; GUICHET, V.; DELPECH, B.; CHAUHAN, A.; AHMAD, L.; SEREY, N. Experimental and theoretical investigation of the performance of an air to water multi-pass heat pipe-based heat exchanger. Energy, v. 219, 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119624. Acesso em: 17 jul. 2025.

JOUHARA, H.; CHAUHAN, A.; NANNOU, T.; ALMAHMOUD, S.; DELPECH, B.; WROBEL, L. C. Heat pipe based systems – advances and applications. Energy, v. 128, p. 729–754, 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2017.04.028. Acesso em: 17 jul. 2025.

NOGUEIRA, É. Heat exchangers: analytical modeling and applications. São Paulo: Editora Dialética, 2025. ISBN: 978-65-270-6139-7 (físico), 978-65-270-6140-3 (e-book). DOI: 10.48021/978-65-270-6139-7. Acesso em: 17 jul. 2025.

NOGUEIRA, É. Thermal and viscous irreversibilities in the heat exchanger of individually finned heat pipes using freon R404A as the working fluid. Mechanical Engineering Advances, v. 1, n. 1, p. 132, 2023. DOI: 10.59400/mea.v1i1.132. Acesso em: 17 jul. 2025.

NOGUEIRA, É. Thermal performance in heat exchangers by irreversibility, effectiveness, and efficiency concepts using nanofluids. Journal of Engineering Sciences, v. 7, n. 2, p. F1–F7, 2020. DOI: 10.21272/jes.2020.7(2).f1. Acesso em: 17 jul. 2025.

PUTRA, N.; ANGGORO, T.; WINARTA, A. Experimental study of heat pipe heat exchanger in hospital HVAC system for energy conservation. International Journal of Advance Science Engineering Information Technology, v. 7, n. 3, 2017. ISSN: 2088-5334. DOI: 10.18517/ijaseit.7.3.2135. Acesso em: 17 jul. 2025.

SUKARNO, R.; PUTRA, N.; HAKIM, I. I.; RACHMAN, F. F.; MAHLIA, T. M. I. Multi-stage heat-pipe heat exchanger for improving energy efficiency of the HVAC system in a hospital operating room. International Journal of Low-Carbon Technologies, v. 16, p. 259–267, 2021. Advance Access publication: 22 jul. 2020. DOI: 10.1093/ijlct/ctaa048. Acesso em: 17 jul. 2025.