



DESEMPENHO DE NANOFLUIDOS EM TROCADORES DE CALOR COMPACTOS: SIMULAÇÃO TERMOHIDRÁULICA E VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

PERFORMANCE OF NANOFLUIDS IN COMPACT HEAT EXCHANGERS:
THERMOHYDRAULIC SIMULATION AND EXPERIMENTAL VALIDATION

FERNANDO SILVA DE ARAÚJO PORTO | fernando.porto@unitau.br | UNITAU
CARLOS HENRIQUE DE PAULA JUNIOR | carlos.hpjunior@unitau.br | UNITAU
LUIZ CARLOS CORDEIRO JUNIOR | luz.cordeiro@fat.uerj.br | UERJ
LUÍS FERNANDO DE ALMEIDA | luis.almeida@unitau.br | UNITAU

RESUMO

O gerenciamento térmico eficiente é crucial para o desempenho e a sustentabilidade de sistemas automotivos modernos. Este artigo investiga a eficiência de transferência de calor em radiadores veiculares operando com nanofluidos de dióxido de titânio (TiO_2). O objetivo principal é comparar o desempenho térmico de misturas convencionais de água desmineralizada e etilenoglicol (EG) com nanofluidos de TiO_2 em baixas concentrações volumétricas. A metodologia consistiu no desenvolvimento de um modelo de simulação termohidráulica em regime permanente, implementado em ambiente Matlab/Simulink através do método ϵ -NUT, validado por ensaios experimentais em uma bancada de testes equipada com sensores de alta precisão e sistema de aquisição de dados. Os resultados demonstram que a adição de nanopartículas de TiO_2 eleva a condutividade térmica efetiva e os coeficientes convectivos, resultando em um aumento na Unidade de Rejeição de Calor (UHR). Observou-se que o ganho térmico é potencializado em condições de elevada vazão de ar externo. Contudo, a análise também revelou penalizações hidráulicas, com aumento da perda de carga proporcional à concentração de nanopartículas. Conclui-se que os nanofluidos de TiO_2 são promissores para otimizar o dimensionamento de trocadores de calor em veículos a combustão e eletrificados, desde que o projeto equilibre o ganho de eficiência térmica com o incremento na potência de bombeamento.

Palavras-chave: Trocadores de calor compactos. Nanofluidos. Simulação computacional. Gerenciamento térmico.

ABSTRACT

Efficient thermal management is crucial for the performance and sustainability of modern automotive systems. This article investigates the heat transfer efficiency in vehicle radiators operating with titanium dioxide (TiO_2) nanofluids. The main objective is to compare the thermal performance of conventional mixtures of demineralized water and ethylene glycol (EG) with TiO_2 nanofluids at low volumetric concentrations. The methodology consisted of developing a steady-state thermohydraulic simulation model, implemented in a Matlab/Simulink environment using the ϵ -NTU method, validated by experimental tests on a test bench equipped with high-precision sensors and a data acquisition system. The results demonstrate that the addition of TiO_2 nanoparticles increases the effective thermal conductivity and convective coefficients, resulting in an increase in the Heat Rejection Unit (UHR). It was observed that the thermal gain is enhanced under conditions of high external air flow. However, the analysis also revealed hydraulic penalties, with an increase in pressure drop proportional to the nanoparticle concentration. It is concluded that TiO_2 nanofluids are promising for optimizing the design of heat exchangers in combustion and electrified vehicles, provided that the project balances the thermal efficiency gain with the increase in pumping power.

Keywords: Compact heat exchangers. Nanofluids. Computational simulation. Thermal management.

1. INTRODUÇÃO

No cenário automotivo contemporâneo, a gestão térmica evoluiu de um requisito de confiabilidade para um pilar de eficiência energética. A crescente densidade de potência em motores a combustão interna e a sensibilidade térmica dos componentes em powertrains eletrificados exigem trocadores de calor cada vez mais compactos e fluidos com alta capacidade de dissipação.

Os fluidos convencionais, como a água e o etilenoglicol, apresentam limitações térmicas intrínsecas. Nesse contexto, os nanofluidos, suspensões coloidais de nanopartículas em fluidos base, surgem como uma solução disruptiva. O dióxido de titânio (TiO_2) é particularmente interessante devido à sua estabilidade química, baixa toxicidade e custo acessível. Este artigo detalha a investigação da performance desses fluidos em um radiador automotivo, confrontando modelos matemáticos clássicos com dados obtidos em bancada experimental.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A análise de trocadores de calor compactos baseia-se na quantificação da taxa de transferência de calor e na avaliação das resistências térmicas.

Mecanismos de Transferência de Calor

A taxa de transferência de calor por convecção entre a superfície das aletas e o ar é regida pela Lei do Resfriamento de Newton:

$$q = \bar{h} \cdot A_{sup} \cdot (T_{sup} - T_{\infty})$$

Onde \bar{h} representa o coeficiente médio de transferência de calor por convecção, T_{∞} , temperatura ambiente, T_{sup} , temperatura da superfície, A_{sup} , área da superfície. Em radiadores, a complexidade geométrica das aletas do tipo *louvered* (persianas) exige o uso do fator de Colburn (j_H) para caracterizar o escoamento externo, definido por:

$$j_H = St \cdot Pr^{2/3}$$

Onde St é o número de Stanton ($St = h / (\rho \cdot c_p \cdot u)$, onde h coeficiente de transferência de calor, ρ a massa específica do fluido), c_p o calor específico e u a velocidade), e Pr é o número de Prandtl ($Pr = \nu / \alpha$, onde ν , viscosidade cinemática, e α , difusividade térmica).

Método ε -NUT

Para a simulação em regime permanente, utilizou-se o método da Efetividade (ε) - Número de Unidades de Transferência (NUT). A efetividade é a razão entre a taxa de transferência de calor real e a máxima possível:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{q}{C_{min} \cdot (T_{q,\varepsilon} - T_{f,\varepsilon})}$$

Onde q , taxa de transferência de calor, C_{min} , capacidade térmica mínima entre os dois fluidos, $T_{q,\varepsilon}$, temperatura do fluido quente na entrada, $T_{f,\varepsilon}$, temperatura do fluido frio na entrada.

Para escoamento cruzado com ambos os fluidos não misturados, a relação utilizada no modelo computacional segue a correlação:

$$\varepsilon = 1 - \exp \left[\frac{NUT^{0,22}}{C_r} (\exp(-C_r \cdot NUT^{0,78}) - 1) \right]$$

Onde ε , efetividade do trocador de calor, NUT , número de Unidades de Transferência, C_r , razão de capacidades térmicas.

3. PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFLUIDOS

A adição de nanopartículas altera as propriedades do fluido base (mistura Água/EG). O modelo de Maxwell foi adotado para estimar a condutividade térmica efetiva:

$$k_{nf} = k_{fb} \cdot \left[\frac{k_{np} + 2 \cdot k_{fb} + 2 \cdot \phi \cdot (k_{np} - k_{fb})}{k_{np} + 2 \cdot k_{fb} - \phi \cdot (k_{np} - k_{fb})} \right]$$

Onde k_{nf} é condutividade térmica efetiva do nanofluido, k_{fb} , condutividade térmica do fluido base, k_{np} , condutividade térmica da nanopartícula, ϕ , fração volumétrica de nanopartículas na mistura.

A viscosidade μ_{nf} , essencial para o cálculo da perda de carga, foi modelada segundo Brinkman:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{fb}}{(1 - \phi)^{2,5}}$$

Onde μ_{nf} , viscosidade dinâmica do nanofluido: μ_{fb} , viscosidade dinâmica do fluido base.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A investigação experimental foi realizada no Laboratório de Fenômenos de Transporte da UERJ/FAT. A bancada consiste em um circuito fechado de fluido quente e um túnel de vento para o ar ambiente (figuras 1 a 6).

- **Circuito do Fluido:** Utilizou-se dois reservatórios com resistências elétricas de 2000W para estabilização térmica. A vazão foi controlada por bomba centrífuga e monitorada por rotâmetro e tubo de Venturi.
- **Circuito de Ar:** O ar é impulsionado por um ventilador centrífugo através de um túnel de vento, com velocidade medida por tubo de Pitot.
- **Instrumentação:** Termopares tipo K foram posicionados nas entradas e saídas do radiador. A aquisição de dados foi realizada em regime permanente, garantindo a repetibilidade dos ensaios.

Figura 1 | Reservatórios superior e inferior, equipados com resistências elétricas de 2000 W, para estabilização térmica do fluido de arrefecimento.



Fonte: Autor.

Figura 2 | Placa de aquisição de dados de alta resolução para monitoramento em tempo real das variáveis térmicas e fluidodinâmicas.



Fonte: Autor.

Figura 3 | Túnel de vento equipado com tubo de Pitot e sensores de temperatura para medição precisa da velocidade e temperatura do ar.



Fonte: Autor.

Figura 4 | Conjunto de rotâmetro e tubo de Venturi para medição redundante e precisa da vazão do fluido de arrefecimento.



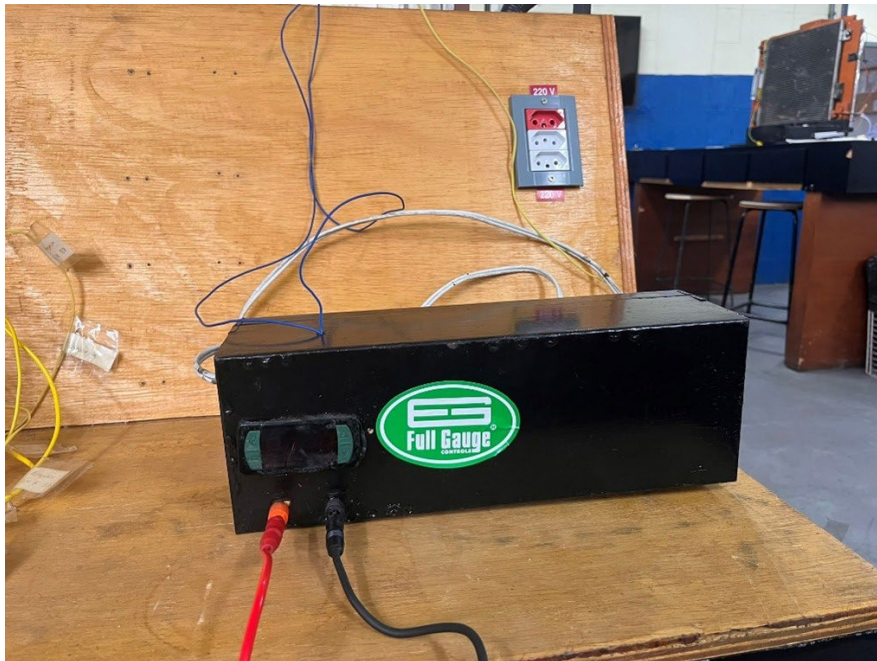
Fonte: Autor.

Figura 5 | Radiador automotivo com coifa de distribuição homogênea de ar e sensores para medição das temperaturas de entrada e saída do fluido e do ar.



Fonte: Autor.

Figura 6 | Dispositivo de controle automático de temperatura para manutenção das condições térmicas de entrada do fluido no radiador.



Fonte: Autor.

As condições operacionais e os parâmetros de entrada estabelecidos para a validação do modelo e realização dos ensaios experimentais encontram-se detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 | Condições de contorno utilizadas nas análises experimental, teórica e por rede neural

Tipo de fluido	Concentração [%]	\dot{m}_f [kg/s]	\dot{m}_q [kg/s]	$T_{q,e}$ [°C]	$T_{f,e}$ [°C]
Água + EG (50/50)	0	5,02	0,14	42,15	21,42
Água + EG (50/50)	0	5,03	0,10	43,86	20,62
Água + EG (50/50)	0,01	5,03	0,12	38,20	20,50
Água + EG (50/50)	0	3,68	0,14	44,36	21,8
Água + EG (50/50)	0	3,69	0,10	39,51	21,61
Água + EG (50/50)	0	2,46	0,10	41,83	21,33
Água + EG (50/50)	0	2,46	0,14	46,78	20,91

Fonte: Elaborado pelo autor

Onde \dot{m}_f , vazão em massa do fluido frio, \dot{m}_q , vazão em massa do fluido quente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram divididos em análise térmica e análise hidráulica.

Validação do Modelo

O modelo implementado em Simulink apresentou uma aderência excepcional aos dados experimentais. Para a mistura EGW 50/50, o erro relativo na Unidade de Rejeição de Calor (*UHR*) foi inferior a 2%. Isso confirma que a parametrização geométrica do radiador (número de tubos, passo das aletas e área frontal) foi corretamente traduzida para o ambiente computacional.

A comparação quantitativa entre os valores de *UHR* obtidos via simulação computacional e os dados coletados experimentalmente é apresentada na Tabela 2, evidenciando o baixo desvio percentual do modelo.

Tabela 2 | Comparação dos valores de UHR obtidos experimentalmente e estimados pelos modelos teórico e de rede neural.

Tipo de fluido	Concentração [%]	UHR_{exp} [W/°C]	$UHR_{teórico}$ [W/°C]	UHR_{RN} [W/°C]
Água + EG (50/50)	0	171,72	172,62	174,61
Água + EG (50/50)	0	153,31	157,77	152,83
Água + EG (50/50)	0,01	161,98	162,56	164,55
Água + EG (50/50)	0	156,39	156,01	160,01
Água + EG (50/50)	0	147,77	143,67	141,90
Água + EG (50/50)	0	159,47	125,35	158,54
Água + EG (50/50)	0	127,34	134,43	130,49

Fonte: Elaborado pelo autor

Influência da Concentração de TiO_2

Observou-se que o aumento da concentração volumétrica de nanopartículas eleva o valor de UHR . Para um número de Reynolds fixo, o nanofluido apresenta um coeficiente convectivo superior ao fluido base devido ao incremento na condutividade térmica. Entretanto, a análise revelou que em regime turbulento, a perda de carga aumenta drasticamente (acima de 90% para concentrações de 30% de TiO_2 , o que pode inviabilizar o uso de concentrações muito altas devido ao consumo elétrico da bomba.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho validou o uso de nanofluidos de TiO_2 como agentes de otimização térmica em radiadores compactos. A convergência entre o modelo teórico ϵ -NUT e a bancada experimental demonstra a viabilidade de utilizar ferramentas de simulação para o projeto de novos sistemas de arrefecimento. Embora os ganhos térmicos sejam evidentes, o projeto de engenharia deve ser criterioso na escolha da concentração para não comprometer a eficiência global do veículo pelo excesso de perda de carga hidráulica.

REFERÊNCIAS

- AHMED, S. A. et al. Improving car radiator performance by using TiO₂-water nanofluid. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 21, n. 5, p. 996–1005, 2018.
- AMAZON WEB SERVICES. **Amazon Machine Learning Developer Guide**. 2023. Disponível em: https://docs.aws.amazon.com/pt_br/machine-learning/latest/dg/machinelearning-dg.pdf. Acesso em: 17 maio 2025.
- ANALYTICS YOGI. **Hold-out Method for Training Machine Learning Models**. 2023. Disponível em: <https://vitalflux.com/hold-out-method-for-training-machine-learning-model/>. Acesso em: 02 out. 2025.
- BASHIRNEZHAD, K. et al. A review of nanofluids in automotive cooling systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 63, p. 87-108, 2016.
- BOHACZ, R. T. **Engine Cooling Systems**. [S. l.]: Penguin Group, 2007. 128 p.
- BRINKMAN, H. C. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. **The Journal of Chemical Physics**, v. 20, n. 4, p. 571-581, 1952.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Blucher, 2012. v. 1.
- CARL, M. et al. **The theoretical and experimental investigation of the heat transfer process of an automobile radiator**. Beaumont: Lamar University, 2012.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4. ed. [S. l.]: McGraw-Hill, 2012.
- CHANG, Y.-J.; WANG, C.-C. A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 40, n. 3, p. 533–544, 1997. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 20 out. 2009.
- CHOI, S. U. S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. **Developments and Applications of Non-Newtonian Flows**, FED-231/MD-66, p. 99–105, 1995.
- CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In: ASME INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION, 1995, San Francisco, CA. **Proceedings [...]**. San Francisco: ASME, 1995.
- CONOVER, W. J. **Practical Nonparametric Statistics**. 3. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1999.
- COWELL, T. A.; HEIKAL, M. R.; ACHAICHIA, A. Flow and heat transfer in compact louvered fin surfaces. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 10, n. 2, p. 192–199, 1995.
- DAS, S. K. et al. **Nanofluids: Science and Technology**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. 397 p.
- DATABRICKS. **O que são redes neurais bayesianas?** 2024. Disponível em: <https://www.databricks.com/br/glossary/bayesian-neural-network>. Acesso em: 02 out. 2025.
- DUANGTHONGSUK, W.; WONGWISES, S. An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 1-3, p. 334-344, 2010.
- EASTMAN, J. A. et al. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. **Applied Physics Letters**, v. 78, n. 6, p. 718–720, 2001.
- EFTEKHAR, M. et al. The impact of nano-fluid concentration used as an engine coolant on the warm-up timing. **International Journal of Automotive Engineering**, v. 3, n. 1, mar. 2013.

- EINSTEIN, A. **Investigations on the Theory of the Brownian Movement**. New York: Dover Publications, 1956. 122 p.
- ELECTRONICS COOLING. **Comparing heat transfer rates of liquid coolants using the mouromtseff number**. 2006. Disponível em: <https://www.electronics-cooling.com>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- FILHO, E. P. B.; NUNES, L. A. O.; OLIVEIRA, J. L. T. Experimental investigation of single-phase flow of nanofluids in tubes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS (ENCIT), 19., 2008, Caxias do Sul. **Anais [...]**. Caxias do Sul: ABCM, 2008. p. 1–8.
- FISHER, R. A. **Statistical methods for research workers**. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1925.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- FRAAS, A. P.; OZISIK, M. N. **Heat Exchanger Design**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1965.
- GÉRON, A. **Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems**. 2. ed. Sebastopol: O'Reilly Media, 2019.
- GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. **International Chemical Engineering**, v. 16, n. 2, p. 359–368, 1976.
- GRANQVIST, C. G.; BUHRMAN, R. A. Ultrafine metal particles. **Journal of Applied Physics**, v. 47, n. 5, p. 2200–2219, 1976.
- HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. **I&EC Fundamentals**, v. 1, p. 187–191, 1962.
- HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction**. 2. ed. [S. l.]: Springer, 2009.
- HAUSEN, H. Darstellung der wärmeübertragung in rohren durch ein einfaches näherungsverfahren. **Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A**, v. 9, p. 4-9, 1943.
- HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.
- HO, C. J.; CHEN, M. W.; LI, Z. W. Numerical simulation of natural convection of nanofluid in a square enclosure: Effects due to uncertainties of viscosity and thermal conductivity. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. 21-22, p. 5053-5067, 2011.
- HODGES, B. Artificial intelligence for engineering design. In: WANG, L.; TAN, K. C.; ZHANG, Y. (ed.). **Handbook of Artificial Intelligence in Engineering**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. cap. 12, p. 287–315.
- HODGES, J. **Approaching Machine Learning Problems in Computational Fluid Dynamics and Computer Aided Engineering Applications: A Monograph for Beginners**. [S. l.]: Independently published, 2024.
- HOLMAN, J. P. **Heat Transfer**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- HT MATERIALS SCIENCE. **Maxwell®: Heat Transfer Fluid Additive**. 2025. Disponível em: <https://htmaterialsscience.com/maxwell/>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- HYDROMX. **Maxwell: Advanced Heat Transfer Nanofluid Additive**. 2023. Disponível em: <https://www.hydomx.com/maxwell/>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of Heat and Mass Transfer**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **O que é desvio padrão?** 2009. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/>

ipea.gov.br. Acesso em: 20 maio 2024.

JIN, Y.; XIE, Y.; DUAN, Z. Review of turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and advances. **Advances in Aerodynamics**, v. 3, n. 12, p. 1–25, 2021.

KAKAÇ, S.; LIU, H.; PRAMUANJAROENKIJ, A. **Heat Exchangers: Selection, Rating, and Thermal Design**. 3. ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2012.

KAYS, W. M.; LONDON, A. L. **Compact Heat Exchangers**. 3. ed. [S. l.]: McGraw-Hill, 1984.

KRÖGER, D. G. **Radiator Characterization and Optimization**. Detroit: SAE International, 1984. (SAE Technical Paper, 840348).

KULKARNI, D. P.; DAS, D. K.; CHUKWU, G. A. Temperature dependent rheological property of copper oxide nanoparticles suspension (nanofluid). **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, v. 6, n. 4, p. 1150–1154, 2006.

KUPPAN, T. **Heat Exchanger Designer Handbook**. 2. ed. Nova York: CRC Press, 2013.

LEITE, R. **Introdução a validação-cruzada: K-Fold**. 2020. Disponível em: <https://rodrigols89.medium.com>. Acesso em: 02 out. 2025.

LIMA, J. A.; OTTERMAN, G. R. **Manual on selection and use of engine coolants and cooling system chemicals**. 4. ed. [S. l.]: ASTM, 1989. 14 p.

LIU, D.; GARIMELLA, S. V. Investigation of liquid flow in microchannels. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, v. 19, n. 3, p. 435–441, 2005.

MAHDI, J. M.; HOBBI, H.; MOHAMMED, H. A. A comprehensive review of the application of nanofluids in heat exchangers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 224–240, 2018.

MATHWORKS. **trainbr**: Bayesian regularization backpropagation. 2024. Disponível em: <https://www.mathworks.com>. Acesso em: 02 out. 2025.

MATHWORKS. **trainlm**: Levenberg–Marquardt backpropagation. 2024. Disponível em: <https://www.mathworks.com>. Acesso em: 02 out. 2025.

MAXWELL, J. C. **A Treatise on Electricity and Magnetism**. 3. ed. New York: Dover, 1954.

MCKINNEY, W. **Python for Data Analysis: Data Wrangling with Pandas, NumPy, and IPython**. 1. ed. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2012.

MOHAMMED, H. A. et al. Nanofluids for automotive radiator applications: A review. **Applied Thermal Engineering**, v. 164, p. 114451, 2020.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 5. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2012.

MOUROMTSEFF, I. E. Water and forced convection heat transfer. **Journal of Heat Transfer**, v. 64, p. 1–8, 1942.

MURSHED, S. M. S.; LEONG, K. C.; YANG, C. Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids: A critical review. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 17–18, p. 3825–3838, 2011.

NEPTUNE.AI. **Cross-Validation in Machine Learning: How to Do It Right**. 2023. Disponível em: <https://neptune.ai>. Acesso em: 02 out. 2025.

NEPTUNE.AI. **Evaluation Metrics for Machine Learning Models: A Comprehensive Guide**. 2023. Disponível em: <https://>

neptune.ai. Acesso em: 02 out. 2025.

NKURIKIYIMFURA, I.; WANG, Y.; PAN, Z. Heat transfer enhancement by magnetic nanofluids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 548–561, 2013.

PAK, B. C.; CHO, Y. I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. **Experimental Heat Transfer**, v. 11, n. 2, p. 151–170, 1998.

PEDREGOSA, F. et al. Scikit-learn: Machine learning in Python. **Journal of Machine Learning Research**, v. 12, p. 2825–2830, 2011.

PRASHER, R.; BHATTACHARYA, P.; PHELAN, P. E. Thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluids). **Physical Review Letters**, v. 94, n. 2, 2005. Disponível em: <http://prola.aps.org>. Acesso em: 02 out. 2025.

RANA, S. et al. Lithium-ion battery thermal management system using MWCNT-based nanofluid flowing through parallel distributed channels: An experimental investigation. **Journal of Energy Storage**, v. 81, p. 110372, mar. 2024.

RASHID, F. L. et al. Application of nanofluids for performance improvement of plate heat exchangers: A comprehensive review. **iScience**, v. 28, p. 113532, 2025.

SAIDUR, R.; LEONG, K. Y.; MOHAMMAD, H. A. A review on applications and challenges of nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1646–1668, 2011.

SCHÖBER, P.; BOER, C.; SCHWARTE, L. A. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. **Anesthesia & Analgesia**, v. 126, n. 5, p. 1763–1768, 2018.

SHAH, R. K.; SEKULIĆ, D. P. **Fundamentals of Heat Exchanger Design**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

SHARIFF, K. B.; ABDULLAHI, B.; ABUBAKAR, S. B. Modelling and simulation of car radiator: Effects of fins under the atmospheric condition of kano, nigeria. **Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences**, v. 48, n. 1, p. 1–16, 2018.

SUNDARARAJAN, T.; AMANO, R. S. A numerical study on the heat transfer performance of compact plate-fin heat exchangers. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 42, n. 9, p. 1739–1749, 1999.

TAYLOR, C. F. Perdas de calor. In: TAYLOR, C. F. **Análise dos motores de combustão interna**. São Paulo: Edgar Blücher, 1971. p. 267–310.

THE MATHWORKS, INC. **Simulink**: Simulation and Model-Based Design. 2023. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. Acesso em: 10 abr. 2025.

TRISAKSRI, V.; WONGWISES, S. Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 3, p. 512–523, 2007.

VELAGAPUDI, V.; KONIJETI, R. K.; ADURU, C. S. K. Empirical correlations to predict thermophysical and heat transfer characteristics of nanofluids. **Thermal Science**, v. 12, p. 27–37, 2008. Disponível em: <http://www.doiserbia.nbs.bg.ac.yu>. Acesso em: 02 out. 2025.

WANG, X. Q.; MUJUMDAR, A. S. A review on nanofluids – part i: Theoretical and numerical investigations. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 4, p. 613–630, dez. 2008.

WEBB, R. L.; JUNG, S. H. Air-side performance of enhanced brazed aluminum heat exchangers. In: ASHRAE WINTER MEETING, 1992, Anaheim. **Proceedings [...]**. Anaheim: ASHRAE, 1992. p. 391–401.

WEN, D. et al. Review of nanofluids for heat transfer applications. **Particuology**, v. 7, n. 2, p. 141–150, 2009.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

WICKHAM, H. Tidy data. **Journal of Statistical Software**, v. 59, n. 10, p. 1–23, 2014. Disponível em: <https://www.jstatsoft.org/v59/i10>.

WITHARANA, S. **Boiling of Refrigerants on Enhanced Surfaces and Boiling of Nanofluids**. 2003. 132 p. Licentiate Thesis (Licentiate Thesis in Energy Technology) — The Royal Institute of Technology, Stockholm, 2003.

XUAN, Y.; LI, Q. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. **Journal of Heat Transfer**, v. 125, n. 1, p. 151–155, 2003.

XUAN, Y.; ROETZEL, W. Conceptions of heat transfer correlation of nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 43, n. 19, p. 3701–3707, 2000.

YU, W.; XIE, H. A review on nanofluids: Preparation, stability mechanisms, and applications. **Journal of Nanomaterials**, v. 2012, p. 1–17, 2012.

