

MONTAGEM DE UMA BANCADA ESTACIONÁRIA PARA AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO TÉRMICO DE UM RADIADOR DE VEÍCULO PESADO

Marcelo Correa Machado Filho, marcelengo.mec@gmail.com

Jhon Jairo Ramírez Behainne, jhon@utfpr.edu.br

Thiago Antonini Alves, antonini@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC),
Avenida Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, Ponta Grossa/PR, CEP 84.017-220

Resumo. Radiadores automotivos são trocadores de calor utilizados em sistemas de arrefecimento dos motores de combustão interna de veículos de grande e de pequeno porte. Dependendo da maneira como acontece o transporte da energia térmica para o ambiente, os radiadores podem influenciar a eficiência do motor, alterando a composição de gases do efeito estufa e outros poluentes atmosféricos, bem como a economia no consumo de combustível. Dados experimentais do rendimento térmico de radiadores automotivos, principalmente daqueles instalados em veículos pesados, são pouco relatados na literatura. Nesse contexto, no presente trabalho é apresentada a montagem experimental de uma bancada estacionária para avaliação do rendimento térmico de um radiador de um motor de caminhão que utiliza água a ser arrefecida em temperaturas de entrada controladas e é operado com diferentes velocidades da corrente do ar ambiente, movimentado pelo ventilador axial acoplado ao sistema. Esse aparato experimental pretende contribuir no aprofundamento da caracterização operacional de radiadores modernos, especificamente, daqueles que possuem aletas com venezianas simétricas, aumentando a troca térmica com o ambiente e diminuindo, tanto a perda de pressão durante o escoamento do ar refrigerante, quanto o peso.

Palavras chave: Radiador Automotivo. Sistema de Arrefecimento. Trocador de Calor. Rendimento Térmico. Motor Diesel.

Abstract. Automotive radiators are heat exchangers used in cooling systems of internal combustion engines of large and small vehicles. Depending of the way which the transport of the thermal energy to the environment the radiator occurs, it could to influence the engine's efficiency and the exhaust gas emission composition, as well as the fuel economy. Experimental data of automotive radiator performance, mainly of those installed in heavy vehicles, are poorly reported in the literature. In this context, the present work shows the experimental assembly of a stationary bench to evaluate the thermal efficiency of a truck engine radiator that uses water heated up at controlled inlet temperatures and also different velocities of the environment air flow that is driven by axial fans coupled to the system. This experimental apparatus looks for to contribute in knowing further about the operation of modern radiators that have fins with symmetrical louvers in their configuration, increasing the heat exchange with the environment and decreasing both the weight and the pressure drop during the passage of the cooling air flow.

Keywords: Vehicle Radiator. Cooling System. Heat Exchanger. Thermal Performance. Diesel Engine.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, as pesquisas por novas tecnologias no setor automotivo têm trazido melhorias significativas no conforto, desempenho e *design* de veículos leves e pesados. Essas melhorias são frutos de soluções do desenvolvimento de componentes mais eficientes, leves e compactos. Nesse contexto, as mudanças implementadas têm contribuído também para a melhoria dos sistemas de arrefecimento dos motores de combustão interna, dos quais têm se exigido um maior rendimento operacional (Ng, 2002). De acordo com Pang *et al.* (2012), o sistema de arrefecimento tem grande impacto no peso do veículo, no desenho frontal e nas características de aerodinâmica do modelo.

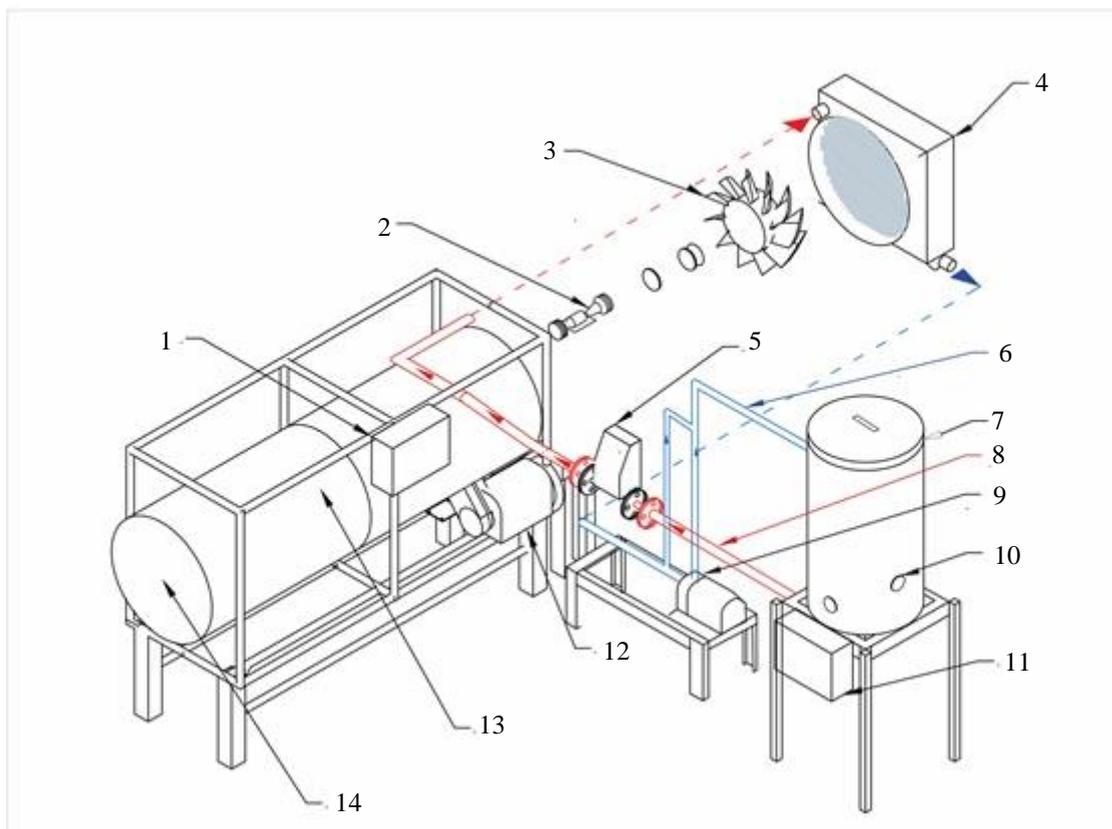
O sistema de arrefecimento do motor funciona como um trocador de calor, que promove a liberação de energia térmica para o ambiente, visando controlar a temperatura das superfícies internas das peças do motor que são aquecidas pelo atrito gerado durante o movimento das peças mecânicas e na combustão. Vaisi *et al.* (2011) mostraram que a geometria e configuração das aletas podem influenciar significativamente as características operacionais do radiador, levando também a determinar o seu tamanho e eficiência.

De acordo com Pabón (2016), as pesquisas que envolvem sistemas de controle de temperatura para motores buscam melhorias nas suas infinitas variações de fluido de trabalho, materiais, ligas, bombas, modelos de aletas, circuitos de tubulação, entre outros. As novas soluções apresentam dificuldades de validação, pois se torna caro testá-las em veículos reais, incentivando os pesquisadores a realizarem os seus estudos em bancadas experimentais estacionárias. Haghghat *et al.* (2018), utilizando uma bancada estacionária, mostraram que sistemas de arrefecimentos inteligentes podem levar a uma redução no gasto de combustível de 1,1%, bem como a uma redução na emissão de poluentes hidrocarbonetos e monóxido de carbono de 5,3% e 6,1% respectivamente.

Nesse contexto, considerando a importância na continuação das investigações que visem uma ampliação no conhecimento sobre o comportamento dos sistemas de arrefecimento automotivos, principalmente de veículos pesados, no presente trabalho é apresentada a montagem experimental de uma bancada estacionária utilizada para avaliação do rendimento térmico de um radiador de um motor de caminhão que utiliza água a ser arrefecida em temperaturas de entrada controladas e operado com diferentes velocidades da corrente do ar ambiente, movimentado pelo ventilador axial acoplado ao sistema. Esse aparato experimental pretende contribuir no aprofundamento da caracterização operacional de radiadores modernos, especificamente, daqueles que possuem aletas com venezianas simétricas, aumentando a troca térmica com o ambiente e diminuindo, tanto a perda de pressão durante o escoamento do ar refrigerante, quanto o peso.

2. DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada estacionária proposta nesse trabalho consiste de um circuito fechado de circulação de água, que simula a passagem da água proveniente do bloco do motor de veículo pesado pelo radiador automotivo, e de um conjunto radiador-ventilador-duto, que impulsiona e canaliza a passagem controlada sobre o radiador automotivo de ar ambiente como fluido de arrefecimento. Uma vista tridimensional dessa bancada experimental é mostrada na Figura 1.



1. Painel de controle de velocidade do ventilador - 2. Mancal e rolamentos para transmissão do ventilador - 3. Ventilador axial - 4. Radiador automotivo - 5. Medidor de vazão eletromagnético - 6. Linha hidráulica (lado refrigerado) - 7. Reservatório térmico - 8. Linha hidráulica (lado quente) - 9. Bomba hidráulica - 10. Banco de resistência - 11. Painel de controle de bomba hidráulica e do banco de resistências elétricas - 12. Motor elétrico do ventilador - 13. Duto para escoamento de ar - 14. Saída do ar.

Figura 1. Diagrama esquemático da bancada estacionária (Autoria própria)

A Figura 2 mostra uma fotografia da vista geral da montagem da bancada experimental estacionária utilizada para a avaliação de desempenho térmico do radiador de veículo pesado. Esse aparato experimental está montado no Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE), vinculado ao Programa de Pós Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Câmpus* Ponta Grossa.

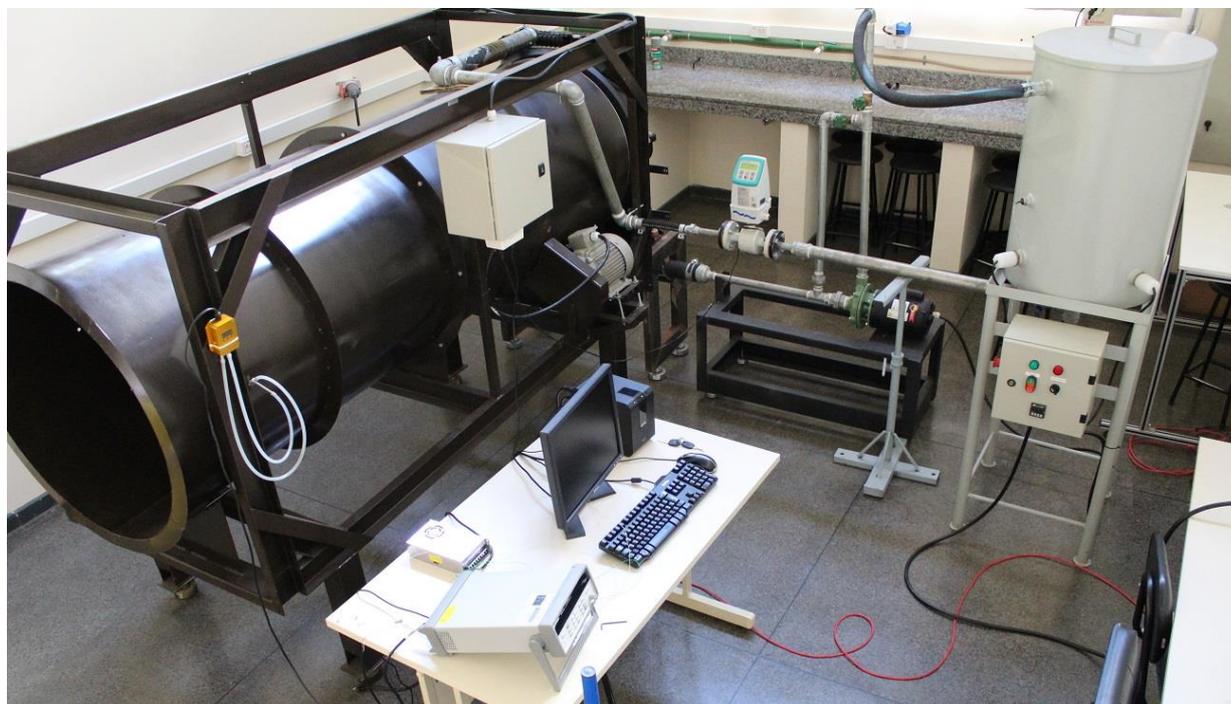


Figura 2. Montagem experimental da bancada estacionária (Autoria própria)

As estruturas de apoio da bancada estacionária experimental foram construídas em aço carbono e de acordo com a necessidade de suporte para cada equipamento integrante do sistema. A montagem dessa estrutura de apoio teve característica modular, visando facilitar o acoplamento da instrumentação, futuras adaptações e desmontagens para manutenção.

2.1. Circuito fechado de água

O sistema hidráulico fechado que transporta o fluido aquecido contém um tanque com um banco de resistências, segmentos de tubulações metálicas e mangueiras, uma bomba hidráulica *Schneider*TM de 1cv e um medidor de vazão volumétrica eletromagnético *Siemens*TM, acoplados com flanges e abraçadeiras para a sua fixação no sistema. As tubulações utilizadas na montagem do circuito fechado de água foram de aço galvanizado SCH40 e mangueiras de borracha. No desenho em vista isométrica da Figura 1, as tubulações indicadas nas cores vermelha e azul representam o caminho do fluido de trabalho aquecido abastecido pelo reservatório de água e o fluido de trabalho arrefecido após a sua passagem pelo radiador automotivo, respectivamente.

No interior do reservatório de água aquecida foram instaladas duas resistências elétricas de 1kW, acionadas por um controlador PID *Omega Engineering*TM. Essas resistências elétricas fornecem o calor necessário à água de circulação, visando simular a carga térmica procedente do bloco do motor de combustão interna do veículo pesado. A temperatura da água que sai do reservatório é controlada mediante um controlador de temperatura conectado a uma termoresistência PT-100. O tanque reservatório foi fabricado em chapa de aço inoxidável de 1,6mm de espessura, possuindo bocais de 1 1/2" de diâmetro nominal para receber as duas resistências elétricas. O tanque tem 773mm de altura e 476mm de diâmetro interno, o que lhe confere uma capacidade de armazenamento de aproximadamente 100 L.

Para a determinação da vazão volumétrica da água aquecida é utilizado um medidor de vazão eletromagnético *Siemens*TM, instalado em tubulação de aço galvanizado de 1 3/4" de diâmetro nominal. Redutores de tubulação para 1" de diâmetro foram utilizados para acoplar o medidor no trajeto de tubulação, na posição horizontal, conforme ilustrado na Figura 3. O medidor de vazão eletromagnético possui painel de leitura digital, com resolução de 0,01L/s, podendo operar com temperatura da água na faixa de 0°C a 90°C.



Figura 3. Medidor de vazão eletromagnético (Autoria própria)

2.2. Radiador de veículo pesado

O radiador automotivo a ser utilizado nos testes experimentais foi doado pela empresa DAF Caminhões do Brasil, tendo aproximadamente 700mm de largura, 1.200mm de altura e 100mm de profundidade. O núcleo aletado do radiador tem dimensões externas aproximadas de 600mm x 1000mm x 100mm e tem capacidade para armazenar 20L do fluido de arrefecimento do motor. A seção aletada consiste de tubos construídos em liga de alumínio, assistidos por aletas do tipo veneziana assimétrica (Figura 4). Na parte superior do radiador automotivo, existe um bocal de entrada de 50mm de diâmetro interno para receber o fluido de arrefecimento do motor. O fluido escoava verticalmente para seção inferior do radiador através dos tubos, sendo assim conduzido para o bocal de saída, de 75 mm de diâmetro interno. O radiador automotivo foi montado sobre uma estrutura de fácil adaptação, construída em aço carbono e com os seus pés apoiados em amortecedores *Vibrastop*TM, visando absorver vibrações durante a operação do sistema. Na entrada e na saída do radiador automotivo foram instalados termopares do tipo K *Omega Engineering*TM e transdutores de pressão *IFM*TM visando a obtenção das temperaturas de entrada e de saída da água e a queda de pressão total no trocador de calor de escoamento cruzado.



Figura 4. Fotografia do radiador automotivo utilizado na bancada estacionária (Autoria própria)

2.3. Conjunto ventilador-duto

No lado do sistema que transporta o ar utilizado para o arrefecimento do radiador automotivo foi instalado um ventilador axial com sistema de embreagem viscosa, também doado pela empresa DAF Caminhões do Brasil. A seção do duto metálico que transporta o ar utilizado para o arrefecimento do radiador veicular possui um comprimento de 2.400mm de comprimento e 735mm de diâmetro interno. Com a finalidade de melhorar a operação do ventilador, foram retiradas proteções internas da correia de transmissão que interferiam na passagem do ar, ajudando a aliviar a queda de pressão e a reduzir as turbulências na corrente do escoamento. O eixo motriz do ventilador axial é transmitido através de um mancal de duplo rolamento, acoplado à estrutura flangeada da embreagem viscosa e eixo de 3/4" (19 mm) apoiado e parafusado em uma mesa na parte interna do duto. A correia a qual transmite o movimento do motor passa da parte interna do duto, para a parte externa, a relação das polias do motor elétrico e do mancal é de 1:1. Esse ventilador axial é acionado por motor de indução trifásico WEGTM de 5CV com velocidade de rotação controlada através de um inversor de frequência WEGTM, induzindo a passagem de ar ambiente através do radiador.

A velocidade média do escoamento de ar através do duto metálico é determinada conforme procedimento adotado em *ASHRAE Fundamentals Handbook* (2001). Essa velocidade será determinada mediante o uso de um tubo de *Pitot* tipo padrão (coeficiente de calibração unitário) da marca *Dywer*TM, Série 160, com 500mm de comprimento, fabricado em aço inoxidável 304, com o qual são realizadas medições de pressão dinâmica (pressão de velocidade) em vários locais da seção transversal do duto e de um transdutor de pressão *Cole-Parmer*TM. A Figura 5 ilustra o tubo de *Pitot* posicionado no interior do duto metálico que transporta o ar de arrefecimento. Termopares do tipo K *Omega Engineering*TM foram instalados a montante e a jusante do radiador automotivo na linha do escoamento do ar, com o propósito de medir a sua temperatura de entrada (temperatura ambiente) e de saída após a troca de calor com a água aquecida que atravessa internamente o radiador automotivo.



Figura 5. Tubo de *Pitot* no interior do duto metálico (Autoria própria)

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nos testes experimentais será utilizado um sistema de aquisição de dados *Keysight*TM 34970A com multiplexador *Keysight*TM 34901A de 20 canais e um computador *Dell*TM para captação das leituras dos transdutores de pressão e dos sensores de temperatura.

Os testes experimentais de avaliação operacional do radiador de veículo pesado devem seguir os procedimentos indicados na norma JIS D1614:1991, com o sistema experimental sendo submetido ao teste da queda de pressão na água e ao teste da quantidade de calor dissipado. Visando reduzir os desvios nas leituras de cada teste experimental, a norma japonesa mostra alguns procedimentos a serem realizados antes do início dos testes: a) inspecionar o radiador automotivo, as aletas e os tubos para verificar se não existem áreas danificadas e os reservatórios superior e inferior, se não existem obstruções; b) verificar se o fluido de arrefecimento está livre de impurezas; c) manter a temperatura do fluido de trabalho em $60^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ maior que a temperatura da sala em que os testes estão sendo executados; e d) manter a sala de teste a uma temperatura entre 5°C e 35°C e a umidade relativa entre 45% a 85%, pois a sala não pode influenciar nem o escoamento e nem a temperatura de entrada do ar no sistema de teste.

Para a execução de cada teste experimental, inicialmente será realizada a purga no circuito fechado de água, visando garantir a ausência de ar na tubulação. Na sequência, será ligada a bomba hidráulica para colocar a água em circulação

pelo sistema, bem como colocados em operação os instrumentos utilizados para a medição das temperaturas dos fluidos de trabalho, da vazão volumétrica da água e das quedas de pressão. Posteriormente, será ligado o banco de resistências elétricas do reservatório de água, buscando atingir o valor da temperatura requerido pelo planejamento do experimento. Esse último procedimento será realizado em paralelo com o início da passagem do ar de arrefecimento pelo radiador automotivo e do ajuste da vazão do ar atmosférico com o auxílio do inversor de frequência acoplado ao motor de 5cv do ventilador e das medições de velocidade realizadas com o tubo de *Pitot*. Uma vez alcançado o equilíbrio térmico do sistema nos valores pré-estabelecidos pelo planejamento experimental, serão iniciados os registros das leituras de temperatura nos pontos definidos no sistema, da vazão volumétrica de água, da velocidade do ar de arrefecimento e da queda de pressão no interior do radiador de veículo pesado. O fluxograma apresentado na Figura 6 mostra a sequência das etapas a serem executadas durante cada teste experimental. Esse procedimento segue a norma japonesa JIS D-1614 incluindo algumas adaptações para complemento do estudo utilizando o *software Engineering Equation Solver (EES™)*.

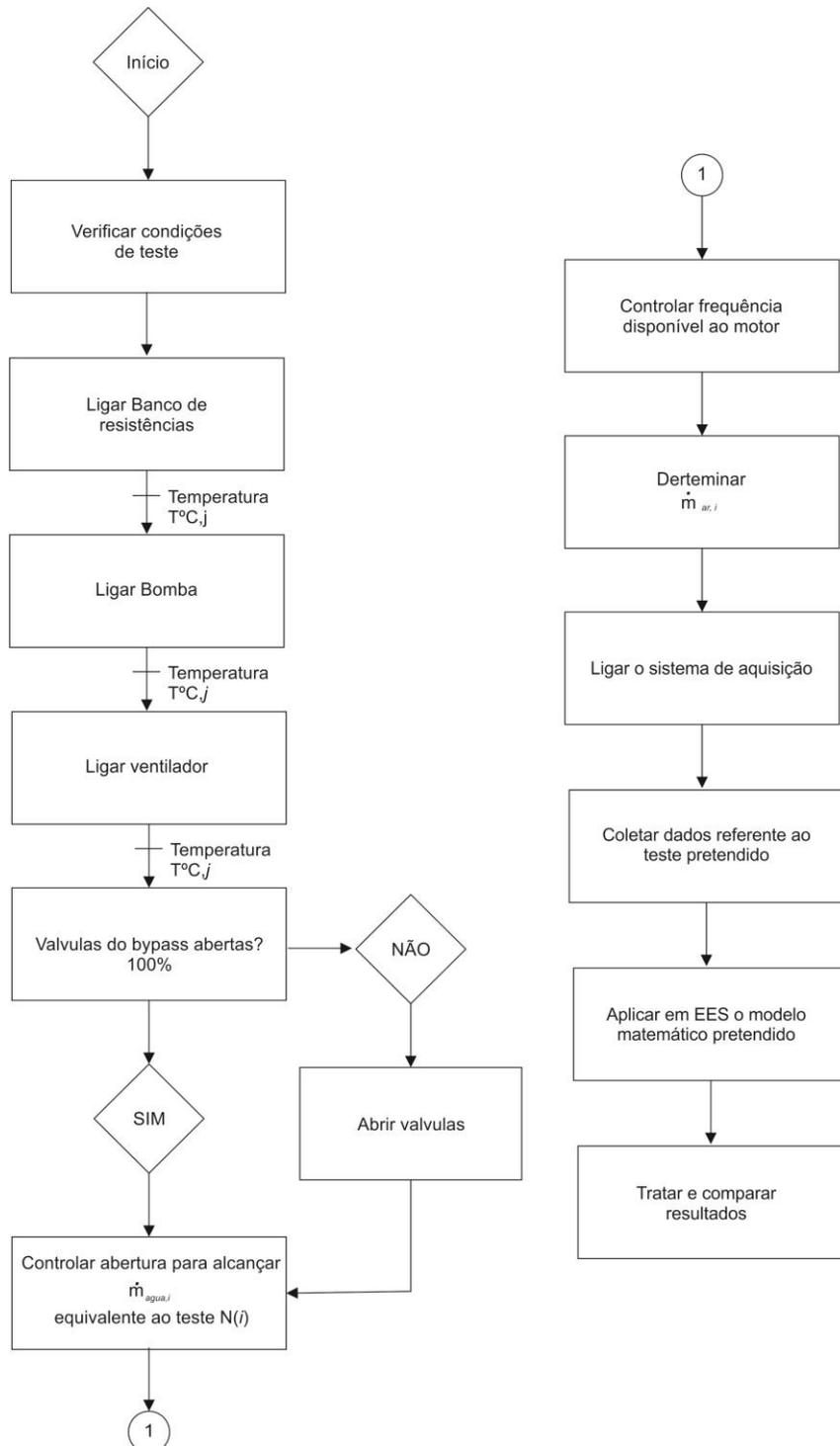


Figura 6. Fluxograma das etapas a serem executadas em cada teste experimental (Autoria própria)

4. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são prestados à DAF Caminhões do Brasil, à Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), ao CNPq, à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPPG) da UTFPR, à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação (DIRPPG), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da UTFPR/Câmpus Ponta Grossa.

5. REFERÊNCIAS

- Haghighat, A.K., Roumi, S., Madani, N., Bahmanpour, D., Olsen, M.G., 2018. “An intelligent cooling system and control model for improved engine thermal management”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 128, p. 253-263.
- Japanese Industrial Standard, 1999. “JIS D-1614: Radiator for automobiles – Test method of heat dissipation”. 22 Dec. 2020 <<https://www.jsa.or.jp>>.
- Ng, E.Y.-T., 2002. *Vehicle engine cooling systems: assessment and improvement of wind-tunnel based evaluation methods*. Tese de Doutorado, RMIT University, Melbourne/AUS.
- Pabón, N.Y.L., 2016. *Projeto e fabricação de um túnel de vento e caracterização térmica de um radiador automotivo*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/BRA.
- Pang, S.C., Kalam, M.A., Masjuki, H.H., Hazrat, M.A., 2012. “A review on air flow and coolant flow circuit in vehicles’ cooling system”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, p. 6295-6306.
- Vaisi, A., Esmailpour, M., Taherian, H., 2011. “Experimental investigation of geometry effects on the performance of a compact louvered heat exchanger”. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, p. 3337-3346.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.