

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA ALESSANDRA SENGER DA ROSA

**BANCADA ESTACIONÁRIA PARA DETERMINAÇÃO
EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM
RADIADOR AUTOMOTIVO DE LINHA PESADA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2021

BRUNA ALESSANDRA SENGER DA ROSA ✉

**BANCADA ESTACIONÁRIA PARA DETERMINAÇÃO
EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE UM RADIADOR
AUTOMOTIVO DE LINHA PESADA**

**Stationary Bench for Experimental Determination of the Thermal
Performance of a Heavy-Duty Automotive Radiator**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador:

Prof. Dr. *Thiago Antonini Alves* ✉ 

Coorientador:

Eng. Mec. *Marcelo Correa Machado Filho* ✉

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite *download* e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos aos autores, sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

BRUNA ALESSANDRA SENGER DA ROSA

**BANCADA ESTACIONÁRIA PARA DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO
DESEMPENHO TÉRMICO DE UM RADIADOR AUTOMOTIVO DE LINHA PESADA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 13 de dezembro de 2021

Thiago Antonino Alves
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Felipe Mercês Biglia
Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Pedro Leineker Ochoski Machado
Engenheiro Mecânico
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Eng. Mec. Victor Vaulek Dimbarre
Engenheiro Mecânico
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PONTA GROSSA

2021

AGRADECIMENTOS

Todas as palavras aqui citadas não irão atender a todas as pessoas que estiveram ao meu lado durante essa etapa da minha vida, de antemão peço desculpas por não estar presente aqui, mas essas pessoas sabem o quanto foram importantes nessa conclusão de mais um desafio a mim dado.

A minha família pelo carinho e por sempre acreditar no meu potencial, toda dificuldade se tornava motivo de apoio e incentivo durante esse desafio.

A Deus, pela benção durante oportunidades dadas durante esse trajeto.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Thiago Antonini Alves pelo suporte e toda sabedoria transmitida durante essa etapa, assim como a confiança para realizar esse trabalho.

A DAF Caminhões, pela doação dos itens que foram utilizados como parte do desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso, ao Departamento de Mecânica (DAMEC) e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), que através de toda estrutura foi possível concluir com sucesso.

RESUMO

Todos os veículos pesados que utilizam a combustão como geração de energia são considerados máquinas térmicas, esse calor gerado pela combustão é transferido por toda sua estrutura do bloco do motor através de condução pelos cilindros que vestem os pistões da máquina. O calor gerado deve ser retirado do sistema através de um sistema que seja responsável pela troca térmica do conjunto. O sistema de arrefecimento faz parte do funcionamento de motores a combustão em geral e é o elemento responsável pelas trocas térmicas entre o motor e o ambiente, todo sistema funciona para manter a temperatura ótima de funcionamento do veículo. Esse sistema compreende componentes que se tornam necessários para o bom funcionamento, sendo eles, bomba d'água, reservatório, trocador de calor, válvulas e sensores. Conhecendo sobre motores e o sistema de arrefecimento é possível realizar a descrição de uma bancada experimental que possa simular um sistema similar ao encontrado nos motores a combustão. Através de uma correlação dos componentes tem-se a descrição de um dispositivo capaz de estudar o desempenho térmico de um radiador automotivo de linha pesada.

Palavras-chave: Engenharia Mecânica; motores (Diesel); meios de transferência de calor; permutadores térmicos.

ABSTRACT

All heavy vehicles that use combustion as power generation are considered thermal machines, this heat generated by combustion is transferred throughout the engine block structure through the cylinders that dress the machine's pistons. The heat generated must be removed from the system through a system that is responsible for the thermal exchange of the set. The cooling system is part of the operation of combustion engines in general and is the element responsible for the thermal exchanges between the engine and the environment, the entire system works to maintain an optimal operating temperature for the vehicle. This system comprises components that are perfect for proper functioning, namely, water pump, reservoir, heat exchanger, valves and sensors. Knowing about engines and the cooling system, it is possible to describe an experimental bench that can simulate a system similar to that found in combustion engines. Through a correlation of the components, there is a description of a device capable of studying the thermal performance of a heavy-duty automotive radiator.

Keywords: Mechanical Engineering; engines (Diesel); heat transfer means; heat exchangers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Cabeçote do motor.....	15
Figura 2 - Bloco do motor.....	16
Figura 3 - Câster do motor	16
Figura 4 - Representação do primeiro tempo	17
Figura 5 - Representação do segundo tempo do motor	18
Figura 6 - Representação do terceiro tempo do motor	18
Figura 7 - Representação do quarto tempo do motor	19
Figura 8 - Formas de transferência de calor	19
Figura 9 - Radiador.....	20
Figura 10 - Bomba d'água.....	21
Figura 11 - Válvula termostática	21
Figura 12 - Tampa do radiador	21
Figura 13 - Ventoinha do radiador	22
Figura 14 - Mangueiras para radiador	22
Figura 15 - Camisa do motor	22
Figura 16 - Representação sistema de arrefecimento	23
Figura 17 - Geometria dos radiadores	24
Figura 18 - Trocador de calor tipo compacto.....	24
Figura 19 - Representação dos tipos de escoamento.....	25
Figura 20 - Tipos de aletas	26
Figura 21 - Esquema de um radiador	26
Figura 22 - Esquema dos tubos do radiador.....	27
Figura 23 - Representação das aletas	27
Figura 24 - Figura representativa do radiador	28
Figura 25 - Modelo para sistema de arrefecimento	29
Figura 26 - Padrão para tubo de <i>Pitot</i>	30
Figura 27 - Posições para medição com <i>Pitot</i>	31
Figura 28 - Esquema do sistema da bancada experimental	32
Figura 29 - Montagem completa bancada experimental estacionária	34
Figura 30 - Radiador automotivo de linha pesada.....	35
Figura 31 - Representação bomba d'água	35
Figura 32 - Medidor de vazão eletromagnético.....	36
Figura 33 - Reservatório do sistema.....	37
Figura 34 - Ventilador automotivo de linha pesada.....	37
Figura 35 - Motor Elétrico.	38
Figura 36 - Esquema transmissão motor.	38
Figura 37 - Inversor de frequência.....	39
Figura 38 - Representação dos túneis de vento	40
Figura 39 - Seção A do túnel de vento.	40
Figura 40 - Seção B do túnel de vento.	40
Figura 41 - Representação 3D montagem	41
Figura 42 - Seção A.	41
Figura 43 - Seção B.	42
Figura 44 - Pés da estrutura.	42
Figura 45 - Suporte de apoio do túnel de vento.	43
Figura 46 - Suporte do radiador.	43
Figura 47 - Suporte bomba d'água.	44

Figura 48 - Sistema de aquisição de dados.....	44
Fotografia 1 - Montagem elétrica	45
Fotografia 2 - Montagem frontal sem radiador	46
Fotografia 3 - Montagem frontal com radiador	47
Fotografia 4 - Montagem lateral	48
Fotografia 5 - Montagem superior com vista mezanino	49
Fotografia 6 -Montagem lateral da bancada experimental.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers</i>
DAMEC	Departamento Acadêmico de Mecânica
JIS	<i>Japanese Industrial Committee</i>
LabMPEE	Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética
NBR	Normas Brasileiras
PMI	Ponto morto inferior
PMS	Ponto morto superior
PPGEM	Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.2	Objetivo geral.....	12
1.3	Objetivo específico.....	12
1.4	Justificativa	12
1.5	Descrição do trabalho	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Características dos motores diesel	15
2.1.1	Partes importantes de um motor	15
2.1.2	Ciclo de quatro tempos.....	17
2.1.3	Calor gerado durante a combustão interna	19
2.2	Sistema de arrefecimento	20
2.2.1	Radiador.....	24
2.2.2	Trocador de Calor do Tipo Compacto.....	25
<u>2.2.2.1</u>	<u>Características e dimensionamento do radiador</u>	<u>25</u>
2.3	Padronização de testes experimentais em radiadores automotivos ...	28
2.3.1	Características de testes em uma bancada experimental	28
2.3.2	Padronização uso do Pitot.....	29
3	METODOLOGIA	32
3.1	Itens da bancada experimental	33
3.1.1	Montagem completa do aparato experimental	33
3.1.2	Radiador automotivo	34
3.1.3	Bomba d'água	35
3.1.4	Medidor de vazão do líquido de arrefecimento.....	36
3.1.5	Reservatório de líquido de arrefecimento	36
3.1.6	Ventilador	37
3.1.7	Sistema de acionamento do ventilador.....	38
3.1.8	Inversor de frequência.....	39
3.1.9	Túnel de vento.....	39
3.1.10	Suportes dos túneis de vento	40
3.1.11	Suporte do radiador.....	43
3.1.12	Suporte bomba hidráulica.....	44
3.1.13	Unidade de Aquisição de Dados	44
4	RESULTADOS	45

4.1	Montagem experimental	45
5	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

Compreendendo que os motores de veículos que utilizam a combustão como geração de trabalho, são considerados como máquinas térmicas, em todo o processo a partir da queima de um combustível há geração de trabalho mecânico e calor. O calor é transferido por toda a estrutura do motor e seus componentes, dessa forma, deve haver um sistema de arrefecimento eficiente para as trocas térmicas, garantindo a temperatura ideal de funcionamento do motor e a integridade dos componentes que fazem parte desse sistema.

O sistema de arrefecimento de um motor Diesel é composto por radiador, ventilador, válvulas e sensores, mangueiras, reservatório, líquido de arrefecimento e uma bomba centrífuga, sendo todo o conjunto responsável pela manutenção da temperatura ótima de funcionamento do motor, permitindo uma troca eficiente de calor entre as partes, evitando com isso os desgastes excessivos das partes e mantendo a eficiência desejada.

O radiador é o principal dispositivo do sistema de arrefecimento, sendo responsável pela troca térmica entre o ar ambiente e o conjunto, proporcionando a manutenção da temperatura ideal do líquido de arrefecimento que circula dentro do motor. O radiador automotivo tradicional é um trocador de calor do tipo placa compacto, possuindo uma grande área de troca térmica, porém ocupando pouco volume, ele contém arranjos com tubos aletados ou placas.

Os trocadores de calor são dispositivos que facilitam a transferência de calor entre dois fluidos que se encontram em diferentes temperaturas e separados por uma parede sólida. Nos trocadores de calor, a principal forma de transferência de calor é por convecção, porém a condução também se faz presente através da parede que separa os dois fluidos. Por isso, o cálculo do coeficiente global de transferência de calor, U , deve ser realizado para obtenção de um valor que englobe todas as transferências de calor envolvidas no trocador. “A taxa de transferência de calor entre os dois fluidos em um local de trocador de calor depende da magnitude da diferença de temperatura no local, que varia ao longo do trocador de calor” (ÇENGEL & GHAJAR, 2012, p. 629).

O coeficiente global de transferência de calor, por exemplo, pode ter uma incerteza de resultado na faixa de 30%, por isso muitos projetos de trocadores de calor

são superestimados. Muitos parâmetros devem ser levados em conta em um projeto de trocadores de calor. A taxa de transferência de calor, a potência de bombeamento que depende do sistema que será construído, a dimensão do trocador, o peso do trocador, o tipo, a forma e os materiais que serão utilizados são parâmetros relevantes na seleção de um trocador de calor (ÇENGEL & GHAJAR, 2012, p. 661-663).

Também é visto que a perda de calor do sistema durante os cursos de compressão e expansão contribui para redução em potência e eficiência, até cerca de 10% da potência e da eficiência do ciclo equivalente de ar/combustível. (TILLMAN, 2013, p. 81).

1.2 Objetivo geral

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), tem como objetivo geral apresentar a descrição de uma bancada experimental para estudo do desempenho térmico de um radiador automotivo de linha pesada.

1.3 Objetivo específico

O objetivo específico deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) é buscar informações em trabalhos relevantes que são levantados os pontos necessários assim como normas regulamentadoras que se tornam essenciais para o desenvolvimento de uma bancada experimental, além de desenvolver um trabalho acadêmico que pode ser utilizado como uma base sólida para trabalhos similares.

1.4 Justificativa

Os trocadores de calor envolvem circunstâncias distintas para um engenheiro. Para a construção de trocadores de calor, há muitos fatores envolvidos como escoamento de fluidos, dimensões do trocador, temperaturas que entram e saem do sistema, além dos cálculos determinantes para as taxas de desempenho do trocador de calor. Há uma determinação de temperatura ótima para o funcionamento do motor a combustão. De acordo com Hossain *et al.* (2017), a temperatura do fluido de arrefecimento varia entre 50°C e 95°C. Para que não haja alterações de desempenho ou desgaste excessivo dos materiais que compõem o sistema automotivo é necessário a utilização de um sistema que refrigere o motor a combustão.

Normalmente são utilizadas bancadas experimentais para estudos do desempenho térmico, que no caso é apresentado no presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC). Essa bancada tem como função simular um sistema de arrefecimento automotivo de linha pesada. O problema é a baixa existência de referências na literatura para que possa ser utilizada como uma base sólida para obter informações sobre a montagem de uma bancada experimental. Desta forma, é necessário desenvolver um estudo sobre os componentes necessários na montagem, assim como normas regulamentadoras que possam auxiliar em futuros testes experimentais de desempenho térmico de um trocador de calor em uma bancada estacionária. Por se tratar de uma temática relacionada a um veículo pesado é possível encontrar normas automotivas, onde essas, são usadas pelas próprias fabricantes e montadoras para determinar a melhor condição para seus veículos.

1.5 Descrição do trabalho

Nesse Trabalho de Conclusão de Curso é apresentada uma descrição de uma montagem de uma bancada experimental estacionária para determinar o desempenho térmico de um radiador automotivo de linha pesada. Para isto é utilizada uma estrutura para organizar melhor a descrição da montagem assim como normas e referências utilizadas como fundamentação do TCC, sendo dividido em 5 capítulos.

No Capítulo 1 foram apresentados uma introdução e os objetivos deste Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, como também a motivação do desenvolvimento do presente trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito do funcionamento de motores Diesel, sendo crucial o entendimento de todos fatores e energias envolvidas para posterior relação com as fundamentações teóricas sobre desempenho térmico. Neste capítulo também são apresentados os tipos de trocas térmicas existentes em um radiador.

No terceiro capítulo são apresentados os componentes da montagem da bancada estacionária experimental, seu funcionamento e também sua relação com o sistema de arrefecimento de veículos pesados, além de ilustrações do projeto detalhado da montagem do aparato experimental.

No Capítulo 4 a descrição da bancada estacionária experimental é mostrada através de fotografias da montagem final e da explicação de alguns pontos que são úteis e necessários nos futuros estudos que serão desenvolvidos com o aparato experimental.

E, finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas com o desenvolvimento desse Trabalho de Conclusão de Curso.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica a respeito do funcionamento de motores Diesel, sistemas de arrefecimento e tipos de trocador de calor.

2.1 Características dos motores diesel

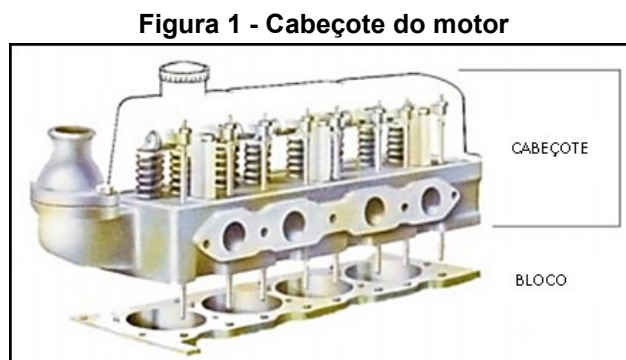
De acordo com Tillmann (2013), os dois principais tipos de motores a combustão, distinguem-se conforme seu funcionamento, a partir da aspiração da mistura ar-combustível (Ciclo Otto) ocorre-se a combustão pela queima da mistura através de uma faísca, os motores que aspiram apenas o ar e que logo após a compressão é pulverizado o combustível, promovendo a queima devido ao elevado calor e pressão gerados pela compressão do ar de admissão é o ciclo Diesel.

De acordo com Varella *et al.* (2010), ambos os ciclos Otto e Diesel podem ser completados em dois ou quatro cursos do pistão. Quando o motor completa o ciclo em dois cursos do pistão é chamado de motor de dois tempos e quando completa o ciclo em quatro cursos é chamado motor de quatro tempos.

2.1.1 Partes importantes de um motor

O motor é constituído principalmente das seguintes partes:

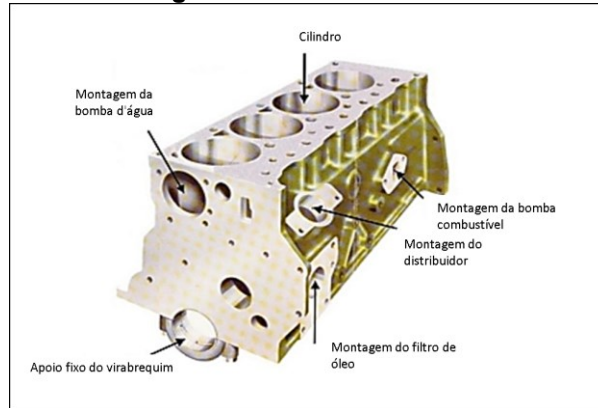
- *Cabeçote* é a parte superior do motor, formado pelas válvulas e eixo de cames ou comando de válvulas, que são responsáveis pela abertura e fechamento das válvulas, controlando tanto o ar de admissão e de descarga do motor (Figura 1). É uma parte essencial para que ocorra a queima do combustível na proporção correta.



Fonte: Varella (2012)

- *Bloco do motor* é a parte central do motor, composto por partes para montagem de bombas d'água, cilindros, bomba de combustível, filtro de óleo e distribuidor (Figura 2). Nas paredes internas do bloco, há câmaras onde há a passagem de água, utilizadas para resfriar o conjunto mecânico.

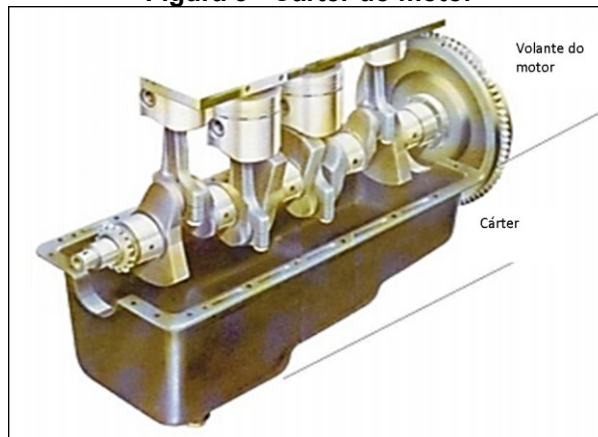
Figura 2 - Bloco do motor



Fonte: Varella (2012)

- *Cárter do motor* é a parte inferior composto pela carcaça e pela bomba de óleo, essa bomba de óleo tem a função de fazer a transferência do óleo no reservatório para o sistema do motor, para que o sistema se mantenha lubrificado (Figura 3).

Figura 3 - Cárter do motor



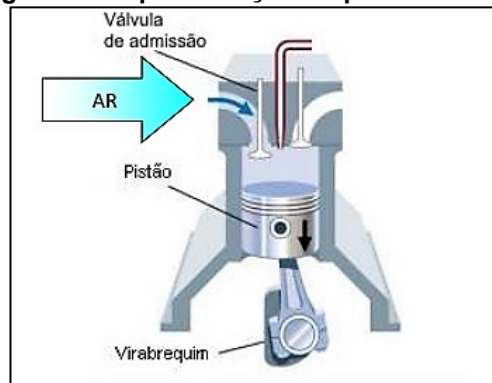
Fonte: Varella (2012)

2.1.2. Ciclo de quatro tempos

Os motores de quatro tempos são assim denominados porque realizam o ciclo em quatro cursos do pistão. O ciclo do motor é composto por quatro fases: admissão, compressão, expansão e descarga. (VARELLA, 2010).

No primeiro tempo, representado na Figura 4, a admissão é realizada, onde o pistão desce, mantendo a válvula de admissão aberta para entrada de ar e de escape fechada. O volume de ar admitido é denominado de volume de admissão ou cilindrado parcial do motor. Esse volume de ar aspirado é sempre o mesmo, sendo a variação da potência é obtida pela variação do volume de combustível injetado de acordo com a posição do acelerador (VARELLA, 2010).

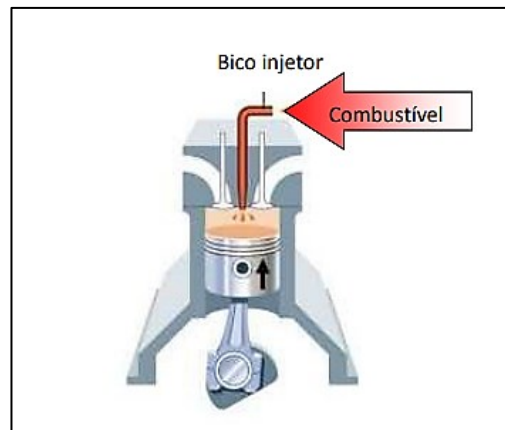
Figura 4 - Representação do primeiro tempo



Fonte: Varella (2012).

No final do tempo de admissão, logo após o êmbolo passar pela posição mais inferior do seu curso (PMI – ponto morto inferior), a válvula de admissão fecha-se, pelo que o êmbolo ao se deslocar no seu curso ascendente, inicia a compressão do ar. Pouco antes do êmbolo atingir a posição mais superior do seu curso (PMS – ponto morto superior) inicia-se a injeção de combustível – Figura 5. Durante o processo de compressão a temperatura do ar atinge várias centenas de graus Celsius, devido ao aumento da pressão que atinge perto de uma dezena de Mpa. Nesse processo é que ocorre a queima do combustível e há a ocorrência do calor gerado dentro da câmara de combustão, todo calor é transferido através das paredes do cilindro. (PEÇA, 2019).

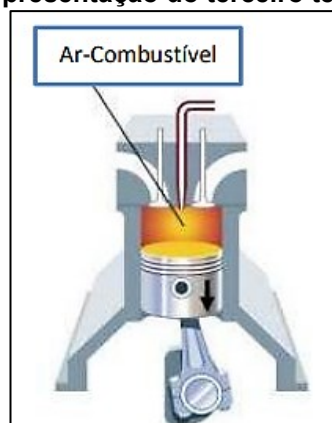
Figura 5 - Representação do segundo tempo do motor



Fonte: Varella (2012)

Durante a expansão o pistão se movimenta do ponto morto superior para o ponto inferior. De acordo com Varella *et al.* (2010), as válvulas de admissão e descarga estão fechadas, a cada passo que o combustível é injetado, como mostrado na Figura 6, a temperatura dos gases aumenta e provoca a dilatação dos mesmos cada vez mais, durante esse processo o pistão é acionado pela força de expansão dos gases transformando a energia térmica em mecânica, essa energia transformada em força é transmitida a árvore de manivelas, através da biela, promovendo assim o movimento de rotação do motor. A expansão é o único curso que transforma energia.

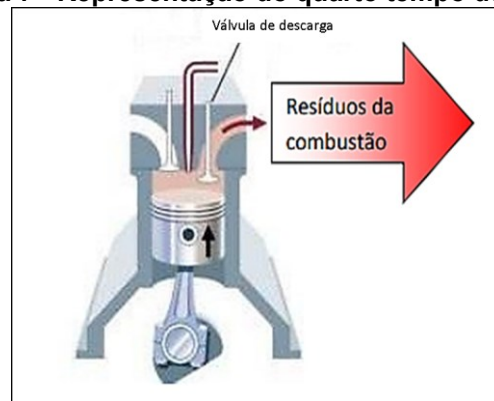
Figura 6 - Representação do terceiro tempo do motor



Fonte: Varella (2012)

De acordo com Peça (2019), pouco antes do êmbolo atingir o PMI, abre-se a válvula de escape. Neste ponto inicia-se a descarga, no qual o pistão é deslocado ascendentemente, que expulsa os gases da combustão para o exterior do motor – Figura 7. Nessa fase, pouco antes do embolo atingir o PMS, abre-se a válvula de admissão e mais um ciclo de 4 tempos se inicia.

Figura 7 - Representação do quarto tempo do motor



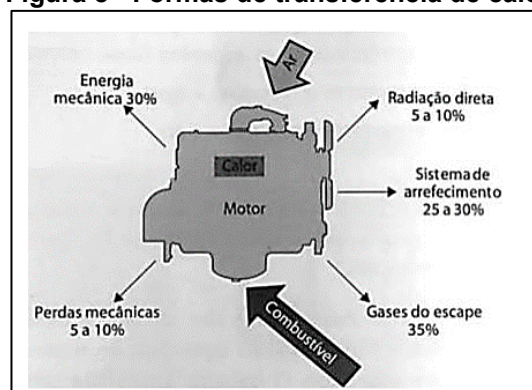
Fonte: Varella (2012)

2.1.3 Calor gerado durante a combustão interna

Durante o processo de combustão nos motores, devido a queima e a produção de gases, há muita variação de temperatura, além da transferência de calor gerado na queima para os cilindros do motor, que é parte componente do bloco. De acordo com Prado (2006), o calor gerado dentro da câmara de combustão é transmitido em todas as direções transferindo energia para as paredes do cilindro, a partir dessa transferência o calor flui através do metal com a mínima resistência.

A Figura 8 ilustra que grande parte da energia gerada durante o processo de combustão não gera trabalho, sendo assim, apenas 30% é responsável pela força gerada no motor e cerca de 25% corresponde a trocas de calor com o ambiente. Todas as trocas ocorrem para a manutenção da temperatura ótima do motor.

Figura 8 - Formas de transferência de calor



Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)

Os processos de transferência de calor ocorrem em função das leis da Termodinâmica, para os motores ditos térmicos que transformam a energia calorífica dos combustíveis ou carburantes em energia mecânica absorvida pela árvore de

manivelas, essa transformação é obtida pela mudança de estado, vaporização; de volume, compressão; de temperatura, combustão. Para tanto, os processos de transferência de calor podem ser descritos como convecção, condução e radiação térmica. (TILLMANN, 2013).

2.2 Sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento é um conjunto de dispositivos eletromecânicos que controla a temperatura dos motores de combustão interna. Os motores de combustão interna são máquinas térmicas relativamente ineficientes (VARELLA, 2012). De acordo com Prado (2006) o sistema de arrefecimento é composto por vários dispositivos mecânicos e elétricos que são responsáveis pela manutenção da temperatura do motor em níveis adequados de funcionamento. O calor gerado nos cilindros é transferido para o ar que circunda o meio.

O sistema de arrefecimento de motores tem como função, a garantia de temperatura de serviço no interior do motor, para que nunca ultrapasse um valor pré-determinado, evitando o superaquecimento das peças e do lubrificante. (TILLMANN, 2013).

Varella *et al.* (2010) informa que inicialmente, tem-se os seguintes componentes do sistema de arrefecimento de um motor automotivo:

- *Radiador* que é o responsável pelas trocas térmicas entre água e o ar, considerado o trocador de calor do tipo compacto utilizado nos sistemas de arrefecimento (Figura 9).

Figura 9 - Radiador



Fonte: APS Distribuidora (2021)

- *Bomba d'água* é o dispositivo que promove a circulação da água no sistema, fica acoplada através de correias e polias no eixo de acionamento da ventoinha (Figura 10).

Figura 10 - Bomba d'água



Fonte: AC Delco (2021)

- *Válvula termostática* é responsável pelo controle da temperatura do escoamento de água do motor para o radiador, inicia-se com uma temperatura de 70°C a 80°C (Figura 11).

Figura 11 - Válvula termostática



Fonte: DPK (2021)

- *Tampa do radiador*, pode ser a princípio um item simples, porém apresenta válvulas que controlam a pressão no radiador (Figura 12).

Figura 12 - Tampa do radiador



Fonte: DPK (2021)

- *Ventoinha ou ventilador* é a parte integrante que força a passagem de escoamento de ar pelo radiador, conectada diretamente ao motor (Figura 13).

Figura 13 - Ventoinha do radiador



Fonte: DPK (2021)

- *Mangueiras* é por onde a água circula da bomba d'água para o radiador (Figura 14).

Figura 14 - Mangueiras para radiador



Fonte: DPK (2021)

- *Camisas d'água* é a superfície externa dos cilindros, formada por galerias onde a água circula no bloco do motor (Figura 15).

Figura 15 - Camisa do motor



Fonte: Allpartsnet (2021)

O calor que é retirado do motor para que haja a manutenção da temperatura ideal de serviço, necessita-se de um fluido de arrefecimento. De acordo com o fluido

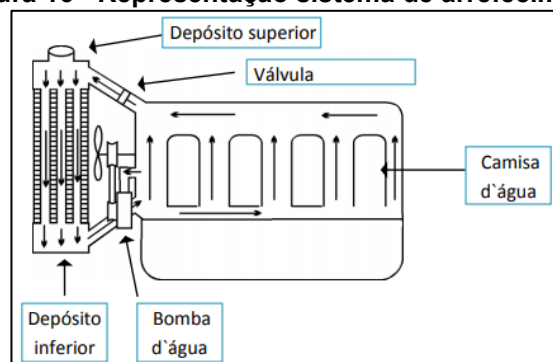
de arrefecimento na maioria dos casos é a própria água com adição de componentes para proteger contra corrosões no sistema, sendo feita uma forma de tratamento com adição de produtos químicos, o chamado aditivo. A quantidade de líquido refrigerante é pequena, gerando em torno de três a seis litros, e parte da reserva do líquido é feito no próprio radiador.

De acordo com Martinelli Junior (2008), a água do sistema de arrefecimento deve ser livre de cloretos, sulfatos e ácidos, com um valor de pH em torno de 8,5. Dessa forma, qualquer água considerada boa para beber pode ser utilizada no motor. A qualidade da água não interfere no desempenho, porém se for utilizada uma água imprópria, pode proceder avarias irreparáveis, nesse caso, iniciado a formação de depósitos de sais minerais, obstruindo as passagens do líquido de arrefecimento e por decorrência disso a troca térmica é dificultada.

Conforme Prado (2006), a maior parte do calor extraído vai para o sistema de arrefecimento, outra parte para o óleo e outra parte diretamente ao meio ambiente através da irradiação do calor pelas peças da superfície. Logo através do líquido de arrefecimento que circula no radiador, recebe energia térmica das paredes internas do motor, e esse fica responsável pela transferência de calor. Hoje os motores trabalham com sistemas forçados de arrefecimento, que além do radiador, há uma bomba d'água e um ventilador, que todos juntos regula-se a temperatura.

De acordo com Varella *et al.* (2010), os sistemas forçados de arrefecimento utilizam em conjunto a água e o ar, no caso a água absorve o calor excedente e através do radiador transfere o calor para o ar ambiente. Na Figura 16 é apresentado um diagrama esquemático do sistema forçado de arrefecimento mostrando as suas partes componentes.

Figura 16 - Representação sistema de arrefecimento

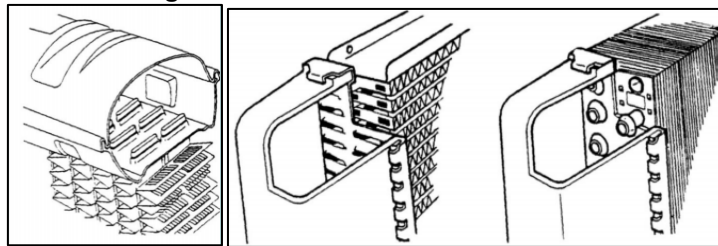


Fonte: Varella (2010)

2.2.1 Radiador

De acordo com Iskandar (2011), o radiador é o componente responsável pela troca térmica do fluido de arrefecimento através do ar atmosférico que passa pelas suas aletas. Nos veículos é instalado na dianteira do automóvel e por mangueiras é conectado ao motor a combustão. Os radiadores são constituídos por uma matriz de tubos e aletas (BRUNETTI, 2012). Conforme Barros *et al.* (2006) além de tubos e aletas, os radiadores são constituídos e definidos de acordo com o sentido de circulação da água, pode ser no sentido vertical e horizontal – Figura 17.

Figura 17 - Geometria dos radiadores



Fonte: Barros *et al.* (2006)

Os trocadores de calor possuem diferentes aplicações que necessitam diferentes tipos de arranjos, sendo classificados de acordo com o escoamento e a maneira de construção. Conforme o tipo de escoamento, podem ser configurados como paralelo ou contracorrente. Podem também ser classificado de acordo com o tipo de construção, tais como: trocador de calor do tipo casco e tubo, trocador do tipo placa, trocador do tipo tubo concêntrico e outro tipo de trocador de calor, de acordo com Çengel & Ghajar (2012), “é especialmente projetado para permitir uma grande superfície de transferência de calor por unidade de volume”, é o trocador de calor compacto – Figura 18.

Figura 18 - Trocador de calor tipo compacto



Fonte: Barros *et al.* (2006)

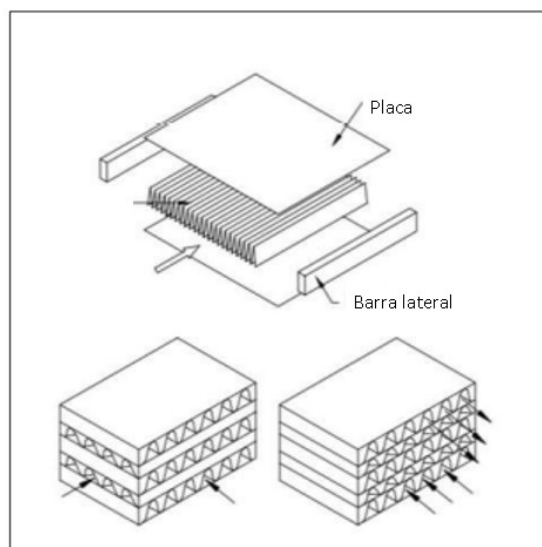
2.2.2 Trocador de Calor do Tipo Compacto

Os trocadores de calor do tipo compacto alcançam altas taxas de transferência de calor entre os fluidos através de um pequeno volume aliado de uma grande área superficial. Esse tipo de trocador de calor é construído com chapas finas ou aletas onduladas afastadas estreitamente nas paredes que separa os fluidos. No radiador automotivo, a troca térmica ocorre através de água e o ar atmosférico. Esses trocadores de calor fazem parte de uma importante classe, onde são utilizados para atingir superfícies de transferência de calor acima de $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ para líquidos e acima de $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ para gases. De acordo com Bejan (2014), as aletas são comumente usadas nos trocadores de calor do tipo compacto, por solicitar um aumento de trocas térmicas através do contato e do fluido que atravessa nas superfícies, com isso tem-se um aumento da transferência de calor.

2.2.2.1 Características e dimensionamento do radiador

De acordo com Bejan & Kraus (2003), a parte que mais sofre variação de forma é o núcleo, normalmente ele é composto por placas paralelas travadas por elemento de metal nas laterais do conjunto. Na Figura 19 tem-se um esquema do trocador de calor compacto com representação dos tipos de escoamento. É possível observar através das imagens o escoamento cruzado, onde o fluido líquido entra de forma cruzada com o fluido ar e o escoamento contracorrente é quando ambos entram no mesmo sentido.

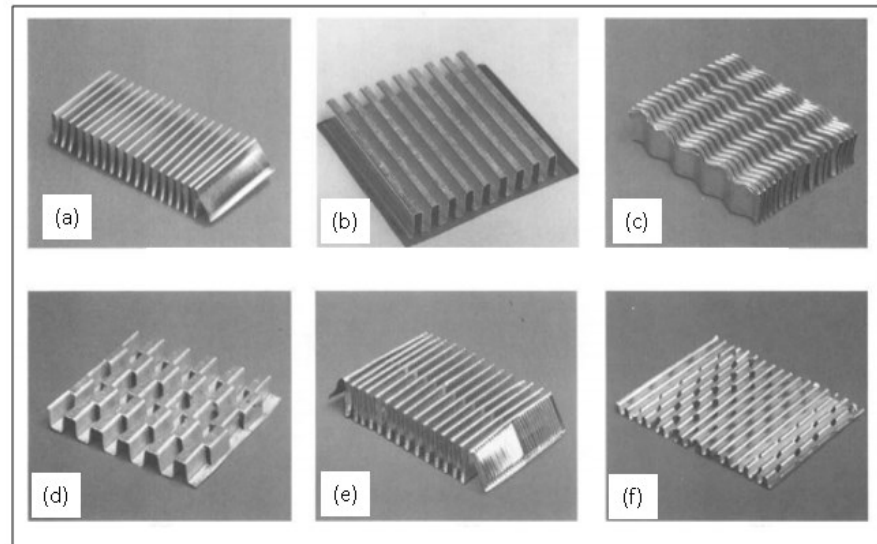
Figura 19 - Representação dos tipos de escoamento



Fonte: Adaptado de Kuppan (2013)

Kuppan (2013) diz que há várias formas diferentes de aletas, que constituem o núcleo do trocador de calor, a figura 20 apresenta alguns modelos de aletas, como (a) e (b) são aletas planas, (c) aletas onduladas, (d) retangulares, (e) triangulares e (f) venezianas.

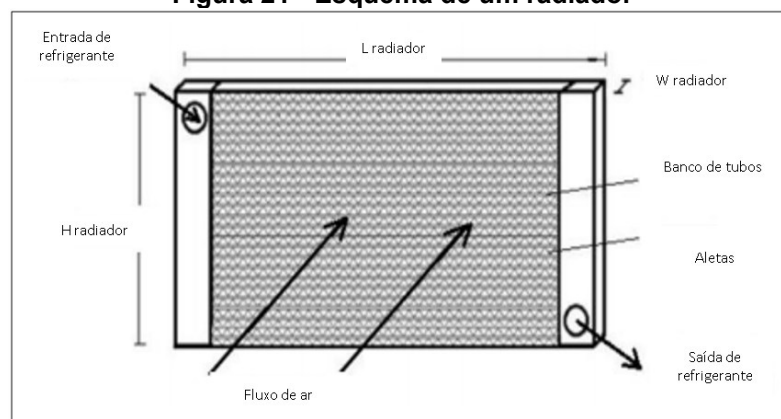
Figura 20 - Tipos de aletas



Fonte: Adaptado de Kuppan (2013)

De acordo com Carl *et al.* (2012), os radiadores automotivos possuem dimensões características, como exemplificado na Figura 21, tem-se L_{radiador} que é o comprimento total do radiador e posteriormente o comprimento do tubo onde tem o escoamento de água e H_{radiador} é a altura do radiador, logo é a soma da altura das aletas e dos n tubos que compõem o sistema.

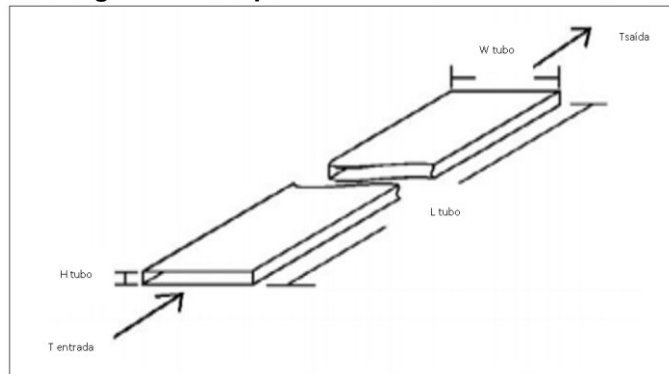
Figura 21 - Esquema de um radiador



Fonte: Carl *et al.* (2012)

Ainda de acordo com Carl *et al.* (2012), a geometria dos tubos que escoam a água pode ser definida como retangulares ou tubulares, nesse caso, a Figura 22, como retangulares, tem-se H_{tubo} como a altura do tubo, L_{tubo} é o comprimento do tubo, sendo igual ao comprimento do radiador, o W_{tubo} é a largura do tubo, considerando como apenas 1 tubo por linha, $W_{\text{tubo}} = W_{\text{radiador}}$.

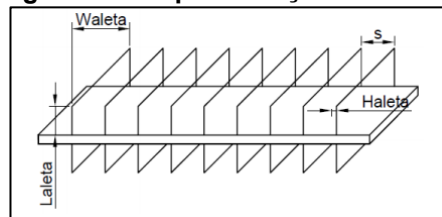
Figura 22 - Esquema dos tubos do radiador



Fonte: Adaptado de Carl *et al.* (2012)

Analisando as aletas que compõem o radiador automotivo, usa-se um modelo de geometria triangular, as espessuras dessas aletas serão consideradas como muito finas, desta forma pode ser idealizada como retas, assim facilita-se futuramente os cálculos. Na Figura 23 define-se a geometria das aletas, W_{aleta} é o comprimento da aleta, que também é a largura dos tubos e a largura do radiador. L_{aleta} é a altura da aleta e a distância entre dois tubos, H_{aleta} é a espessura de uma aleta e s é a distância entre duas aletas (CARL *et al.*, 2012).

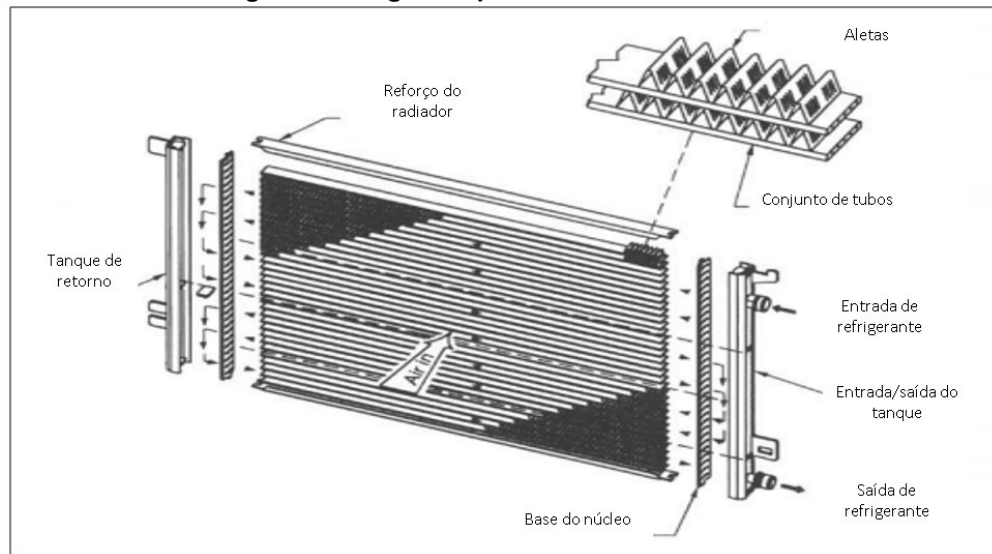
Figura 23 - Representação das aletas



Fonte: Carl *et al.* (2012)

Na Figura 24 é mostrado um diagrama esquemático de um trocador de calor automotivo fornecido pela Delphi Harisson Thermal Systems (SHAH; SEKULIC, 2003).

Figura 24 - Figura representativa do radiador



Fonte: Adaptado de SHAH; SEKULIC. (2003)

2.3 Padronização de testes experimentais em radiadores automotivos

De acordo com Pabón (2014), os radiadores automotivos quando submetidos a testes seguem normas para montagem de bancadas experimentais, essas normas são específicas para sistemas de arrefecimento, sendo normas brasileiras NBR-NM-178:1998, NBR 14335:1998, NBR 14734: 2001, NBR 15147:2004 e NBR 15563:2008 ou normas internacionais, sendo elas: JIS D-1614:1991.

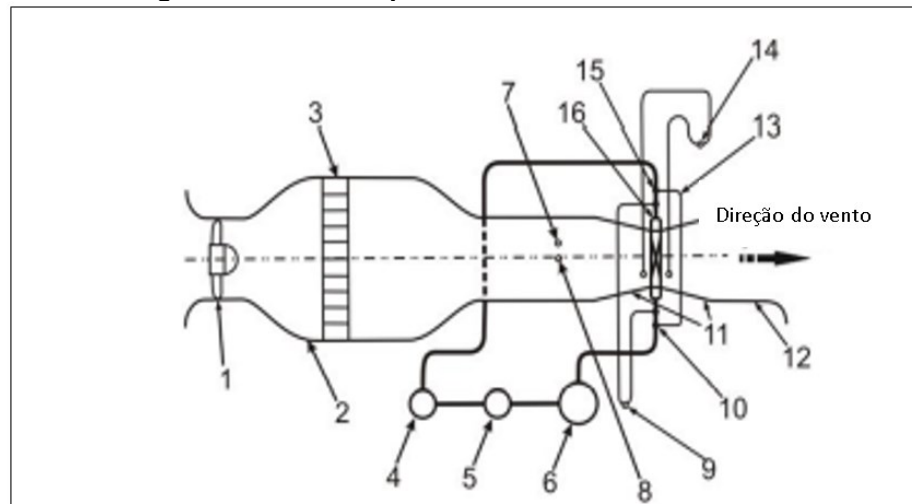
2.3.1 Características de testes em uma bancada experimental

Pábon (2014), menciona que tanto a norma japonesa JIS D-1614:1991 (*Japanese Industrial Standards Committee*) e a norma indiana IS 13687 do *Bureau of Indian Standards* apresentam uma solução de testes de dissipação térmica de radiadores automotivos, estipulando características do banco de testes. Essas normas estabelecem que o aparato experimental deve ter um circuito para cada fluido, onde o sistema de arrefecimento deve ter um tanque de água capaz de abastecer a energia que representa a carga térmica do motor a ser dissipada pelo radiador automotivo, medidor de vazão da água e as tubulações, também deve ter um ventilador, um retificador de escoamento e dutos, assim como um sistema de medição de vazão do ar atmosférico.

A Figura 25 mostra um aparato experimental sugerido pela norma JIS D-1614:1991: 1) ventilador; 2) túnel de vento; 3) colmeia retificadora; 4) medidor de

vazão de água; 5) bomba d'água; 6) tanque de água quente; 7) termopar na entrada de ar; 8) medidor de vazão do ar atmosférico; 9) medidor de pressão diferencial para a perda de pressão do lado da água; 10) termopar na saída da água; 11) tubo de conexão; 12) tubo de descarga; 13) medidor da diferença de temperatura entre a entrada e a saída da água; 14) medidor de pressão diferencial para a perda de pressão do lado do ar atmosférico; 15) termopar de água de entrada e 16) radiador automotivo.

Figura 25 - Modelo para sistema de arrefecimento

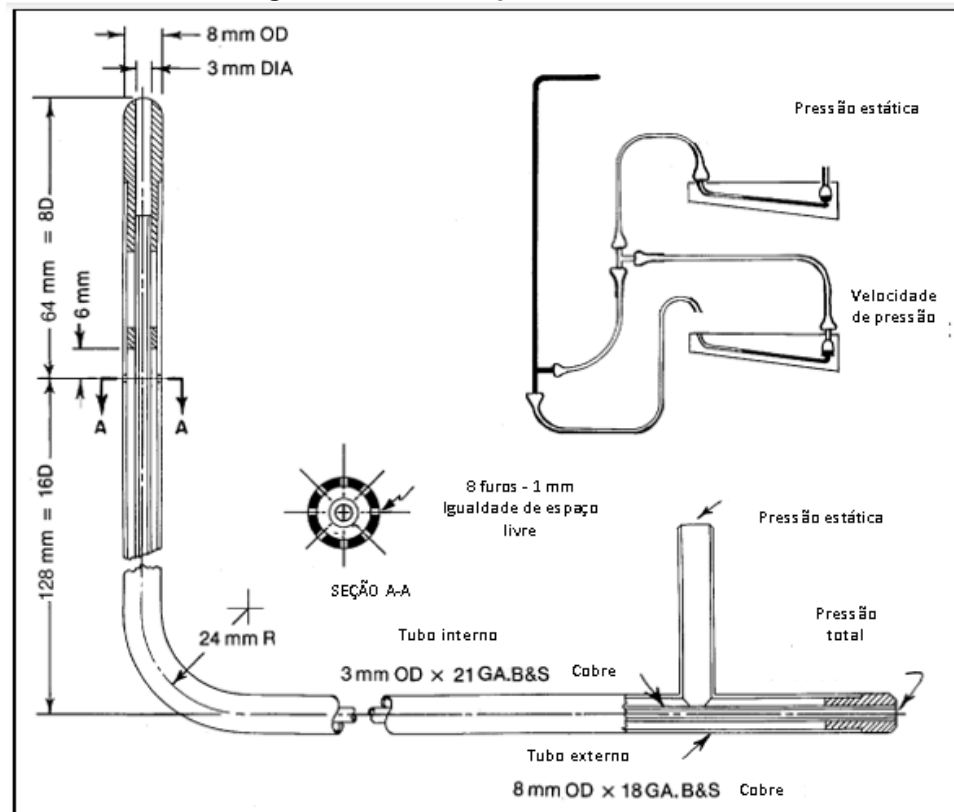


Fonte: JIS D-1614:1991

2.3.2 Padronização uso do *Pitot*

Para obtenção da velocidade do ar atmosférico que escoar através do radiador automotivo, é necessário o uso de Tubos de *Pitot*, onde são feitas medidas de pressão dinâmica em seções do aparato experimental. A Figura 26 mostra um padrão de tubo de *Pitot* que deve ser utilizado em testes, porém de acordo com *ASHRAE Handbook* (2001) para atender condições especiais, vários tamanhos de tubos de *Pitot* estáticos podem ser usados, desde que semelhantes geometricamente.

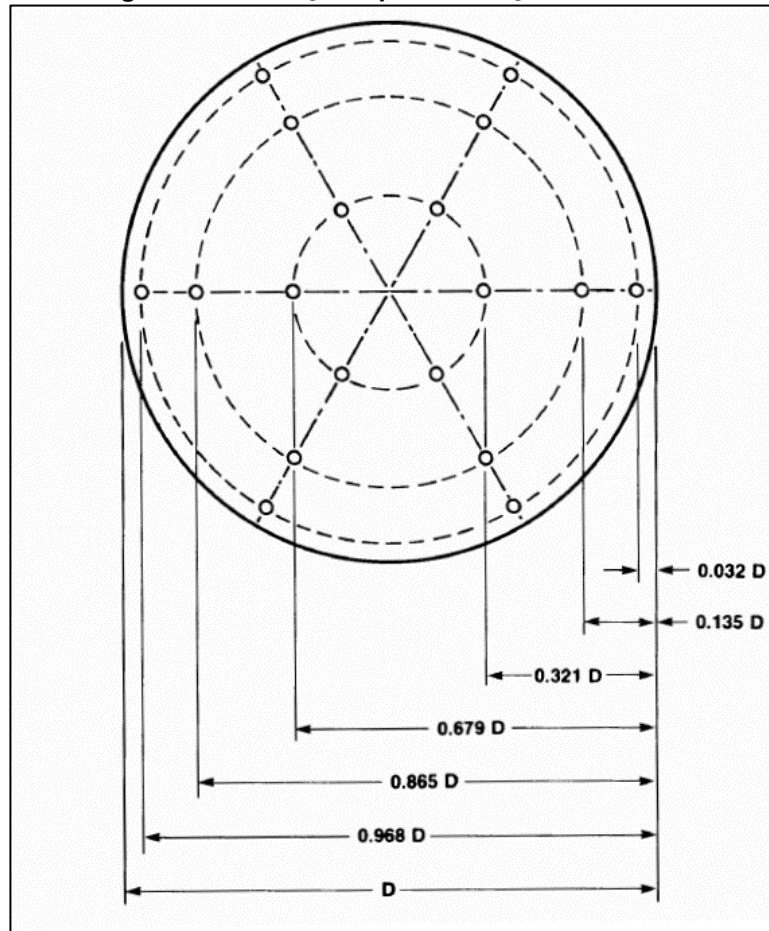
Figura 26 - Padrão para tubo de Pitot



Fonte: Adaptado de ASHRAE Handbook (2001)

Como a velocidade do ar dentro de um túnel de vento não é uniforme de acordo com várias seções de teste, é interessante realizar medidas em pontos individuais, para isso há uma regra para testes realizados com esse dispositivo, lembrando que a velocidade é geralmente mais baixa perto de bordas e maior no centro. De acordo com ASHRAE Handbook (2001), os pontos determinados para testes são regrados por *log-Tchebycheff* (ISO Padrão 3966). A Figura 27 mostra o local sugerido para instalação dos tubos de Pitot para medição da passagem de ar. A regra apresenta as posições para posicionamento do tubo de Pitot e diz que quando há pontos onde há uma instabilidade da medição, próximo a pontos de turbulência, os pontos de posicionamento podem ser aumentados, seguindo o padrão estabelecido pela literatura. Também podem ser instaladas de acordo com ASHRAE Standard 51, aletas de endireitando para melhorar a precisão de medição, caso necessário. Caso pressão negativas sejam encontradas, elas são consideradas um valor de medição zero e calculado posteriormente na pressão de velocidade média, de acordo com informações ASHRAE Handbook (2001).

Figura 27 - Posições para medição com *Pitot*

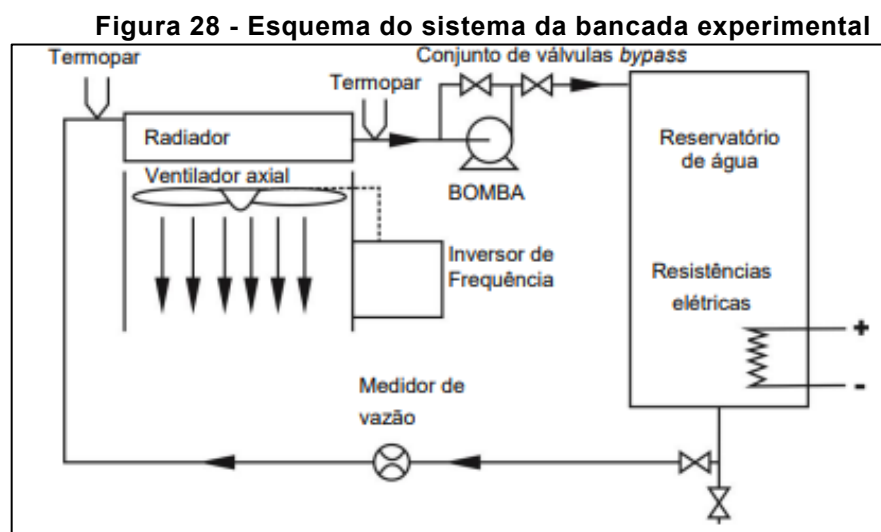


Fonte: Adaptado de ASHRAE Handbook (2001)

Para uma melhor explicação da figura 27, a distância descrita como D é a diâmetro total do túnel de vento projetado para testes, cada cota representa a distância entre os pontos que são necessários de acordo com a posição desejada, por exemplo, para utilizarmos 6 pontos de referência no túnel de vento, é interessante que o primeiro ponto seja à $0,032$ vezes o valor do diâmetro total do túnel, o segundo ponto é considerado a $0,135 \cdot D$ e assim consecutivamente, de acordo com a figura apresentada.

3 METODOLOGIA

De acordo com Machado Filho (2021), a instalação de uma bancada estacionária que simula o sistema de arrefecimento de um veículo automotivo pesado é dada como na Figura 28. O diagrama esquemático é representado primeiramente por um reservatório de água com resistências elétricas, onde essas resistências serão responsáveis pelo aquecimento da água ou outro fluido em estudo para simular a temperatura do fluido que sai do motor a combustão no sistema de arrefecimento. Conforme Hossain *et al.* (2017), a temperatura do fluido refrigerante varia entre 50°C e 95°C, para que não haja alterações no desempenho ou desgaste excessivo dos materiais que compõem o sistema de motor. Através de um conjunto de válvulas ligadas na saída do reservatório é ligado uma tubulação até a entrada do radiador, para escoamento de água, entre o radiador e o reservatório é instalado um medidor de vazão eletromagnético, visando a coleta de dados, um termopar é conectado na entrada no radiador para aferir temperatura de entrada da água. O sistema consiste pela passagem de água ou o fluido refrigerante pelos canais do radiador, na saída do radiador, há um outro termopar conectado por uma tubulação, onde através de uma bomba será realizado a sucção do líquido e transferido novamente ao reservatório para que o processo ocorra em circuito fechado. Existe também um sistema composto por túnel de vento, ventilador, motor elétrico e painel elétrico para promover o escoamento cruzado de ar atmosférico sobre o radiador automotivo.



Fonte: Marcelo Filho (2021)

De acordo com a Norma JIS D-1614: 1991, a montagem do aparato experimental deve possuir uma série de itens componentes da montagem. Alguns itens apresentados aqui, foram disponibilizados a partir de uma concessão proveniente da montadora DAF™ Caminhões do Brasil situada na cidade de Ponta Grossa/PR.

3.1 Itens da bancada experimental

De acordo com Mehta (1977) a seção de testes é totalmente dependente de cada requisito do experimento, o modelo de prova que vai determinar as dimensões nas seções de testes, que deve ser projetada para reduzir ao mínimo a interferência do túnel de vento nos testes experimentais. Sendo que o comprimento recomendado deve variar de 1 e 1,5 vezes sua largura (BARLOW *et al.*, 1999), isso que a camada limite cresce ao longo da seção de testes, sendo que sua área efetiva reduz quando a velocidade é aumentada.

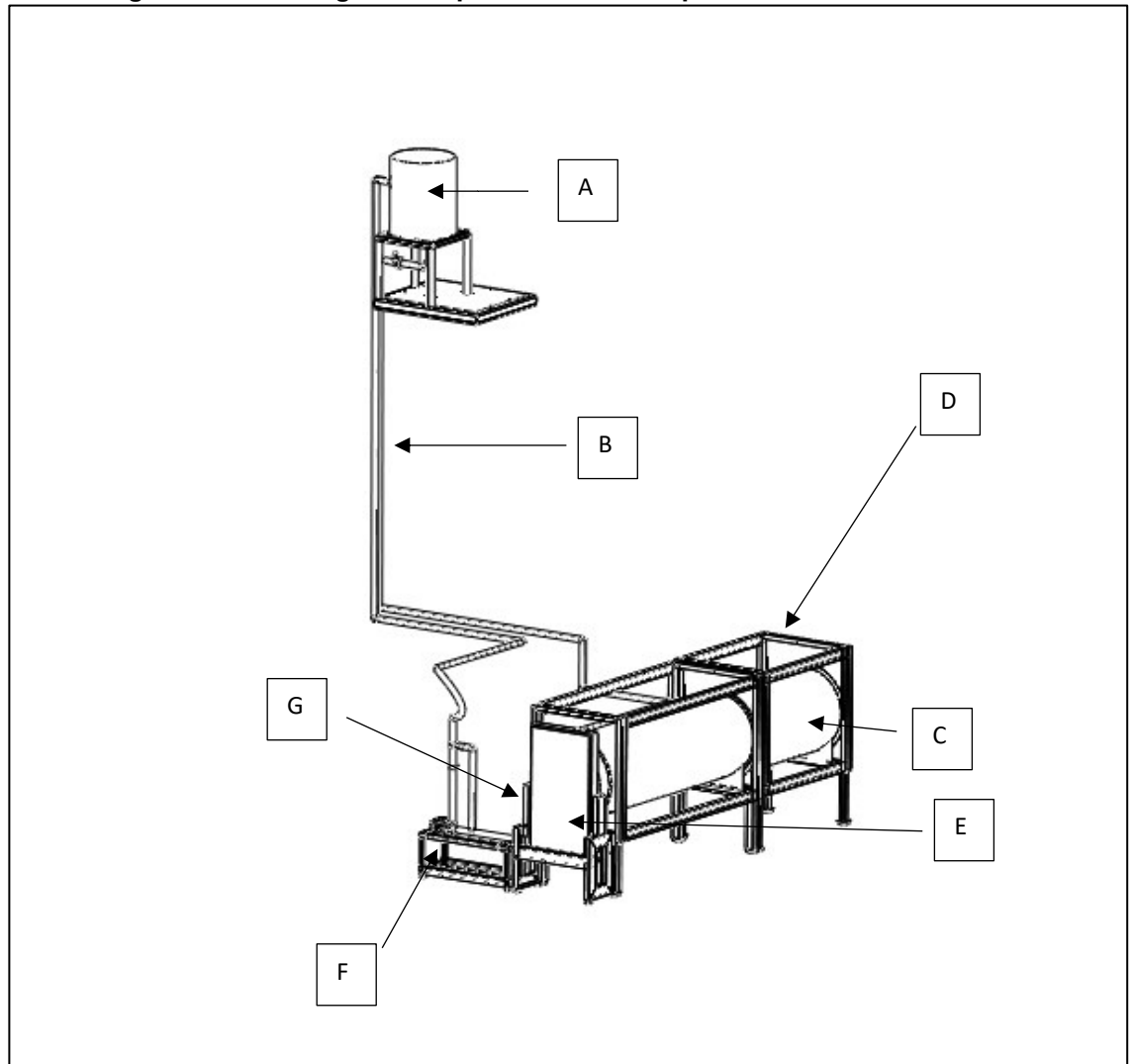
3.1.1 Montagem completa do aparato experimental

Nessa subseção é apresentada a representação da montagem completa da bancada experimental estacionária para determinação do rendimento térmico utilizando um radiador automotivo de linha pesada para posteriormente utilização em estudos e ensaios.

O conjunto é composto por três sistemas que se completam na montagem experimental, sendo o primeiro, a parte do suporte que sustenta a montagem do aparato, assim como o túnel de vento que é acoplado ao restante do conjunto, a segunda parte é correspondente ao sistema de circuito fechado de água, por terceiro, o sistema de ar de arrefecimento e por último, a parte elétrica, responsável pela ligação a energia, funcionamento e medição e controle dos resultados.

Na Figura 29 é mostrada a montagem completa, seguida dos indicativos de cada parte do conjunto: A) reservatório do líquido de arrefecimento (tanque de água); B) tubulações de entrada e saída do sistema de líquido de resfriamento; C) túnel de vento; D) estrutura do conjunto; E) radiador automotivo de linha pesada; F) bomba hidráulica e G) motor elétrico.

Figura 29 - Montagem completa bancada experimental estacionária



Fonte: Autoria Própria

Todo aparato experimental da bancada estacionária se baseia no referencial teórico apresentado anteriormente, com os itens fundamentais para a montagem do sistema de arrefecimento, para que funcione da maneira correta.

3.1.2 Radiador automotivo

Como mencionado anteriormente, através de uma parceria entre Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e DAFTM Caminhões do Brasil, foi cedido partes do sistema de arrefecimento de motor a combustão para estudos no âmbito acadêmico, o radiador automotivo cedido pela empresa é de um veículo pesado. O modelo do radiador se enquadra em um trocador de calor tipo compacto, o qual é utilizado em veículos no mercado nacional e internacional, devido a sua grande capacidade de troca térmica do motor com o ambiente. O radiador tem

aproximadamente 700mm de largura, 1200mm de altura e 10mm de comprimento, com capacidade de 20 litros de armazenamento de fluido de arrefecimento. A Figura 30 mostra um radiador do modelo que foi cedido pela empresa DAFTM Caminhões do Brasil.

Figura 30 - Radiador automotivo de linha pesada



Fonte: DAF Caminhões do Brasil (2021)

3.1.3 Bomba d'água

Para a montagem do sistema hidráulico da bancada estacionária, é utilizada uma bomba hidráulica para forçar o escoamento de água dentro da tubulação do conjunto, a utilização da bomba é equivalente a bomba d'água utilizada no sistema automotivo, onde a função se torna a mesma no aparato experimental. A bomba hidráulica, figura 31, possui vazão mínima de 6,1m³/h e máxima de 20,6m³/h, com uma altura máxima de 19mca e mínima de 7mca, rotação do motor a 3500 rpm e pressão máxima de 20 mca. A bomba é do modelo BC-927T da SchneiderTM Bombas.

Figura 31 - Representação bomba d'água



Fonte: Schneider (2021)

3.1.4 Medidor de vazão do líquido de arrefecimento

Para verificação da vazão volumétrica do líquido de arrefecimento que passa pelo sistema hidráulico foi utilizado um medidor de vazão eletromagnético da Siemens™ – Figura 32.

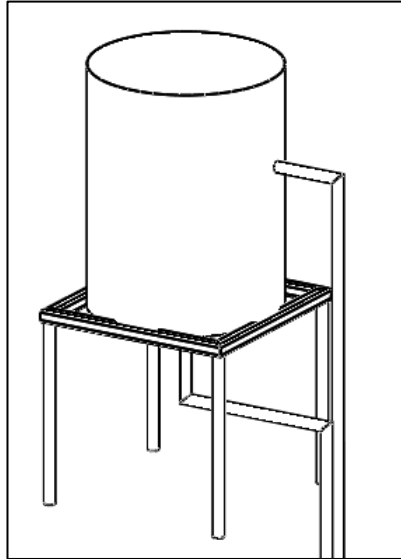
Figura 32 - Medidor de vazão eletromagnético



Fonte: Siemens (2021)

3.1.5 Reservatório de líquido de arrefecimento

O reservatório de líquido de arrefecimento (tanque de água) é fundamental para o sistema hidráulico da bancada experimental estacionária pois, ele será responsável pelo acondicionamento de líquido para transferência até o radiador, é semelhante ao reservatório utilizado nos veículos comerciais nacionais e internacionais, porém devido as condições de testes e disponibilidade do sistema, o reservatório é fabricado de aço inoxidável em chapas de 1,6mm de espessura, com duas resistências instaladas na sua lateral, onde é responsável pelo aquecimento da água, chegando a temperatura ideal de trabalho de um veículo pesado. As dimensões do reservatório são de 476mm de diâmetro com 773mm de altura, correspondente a cerca de 100 litros de capacidade. Esse reservatório está instalado a aproximadamente 6m do nível do solo e está representado na Figura 33.

Figura 33 - Reservatório do sistema**Fonte: Autorial Própria**

3.1.6 Ventilador

Como apresentado no referencial teórico, o ventilador é um item importante para a montagem de um sistema de arrefecimento, portanto isso não poderia faltar na configuração da bancada experimental estacionária em questão. O ventilador usado no aparato experimental, também faz parte dos materiais cedidos pela DAFTM Caminhões do Brasil, sendo uma ventoinha de um veículo da linha pesada. Como foi citado por Machado Filho (2021), foi necessário realizar a retirada do acoplamento de um sistema de embreagem viscosa e também proteções internas que poderiam interferir na passagem de ar durante o desenvolvimento dos testes. Uma representação do ventilador é apresentada na figura 34.

Figura 34 - Ventilador automotivo de linha pesada**Fonte: DAF Caminhões do Brasil (2021)**

3.1.7 Sistema de acionamento do ventilador

Para realizar o acionamento do ventilador, parte integrante do radiador e demais componentes do sistema de arrefecimento, é necessário um motor elétrico, e um conjunto de transmissão, para que a força motriz do motor seja transferida para o ventilador. O motor elétrico utilizado no sistema é do tipo trifásico de 5CV da marca Marathon Motores™ (Figura 35).

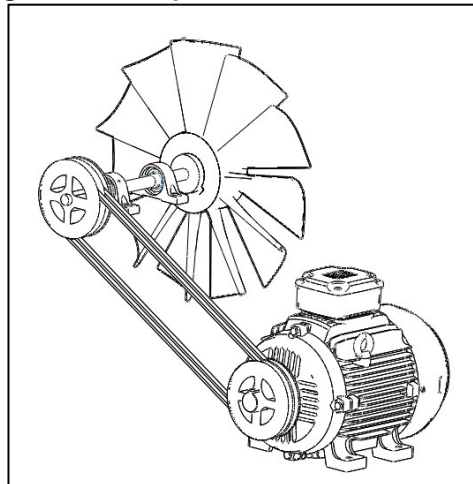
Figura 35 - Motor Elétrico



Fonte: Marathon Motores (2021)

Na extremidade do eixo possui uma polia dupla para o acoplamento de correias à polia que é integrante do eixo do ventilador, essa relação de montagem é de 1:1, de acordo com a disponibilidade de materiais. Na extremidade da polia que é integrante do eixo conectado ao ventilador, são utilizados como base de eixo de 3/4", um mancal duplo, compatíveis com as medidas do eixo. Essa montagem é representada pela Figura 36.

Figura 36 - Esquema transmissão motor



Fonte: Aatoria Própria

3.1.8 Inversor de frequência

De acordo com o esquema de instalação de Machado Filho (2021), é necessário a utilização de um inversor de frequência, que é o componente responsável pelo controle de rotação do motor elétrico, esse controle de rotação, é uma simulação da velocidade do veículo quando está trafegando, visto que quando maior a velocidade do veículo, maior a quantidade de ar passando pelo radiador. O inversor de frequência que é utilizado é um WEG™ CFM300, como ilustrado na Figura 37.

Figura 37 - Inversor de frequência

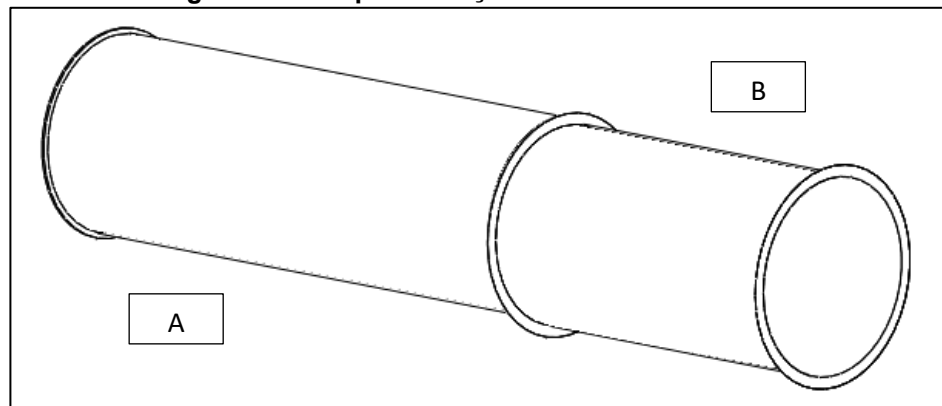


Fonte: WEG (2021)

3.1.9 Túnel de vento

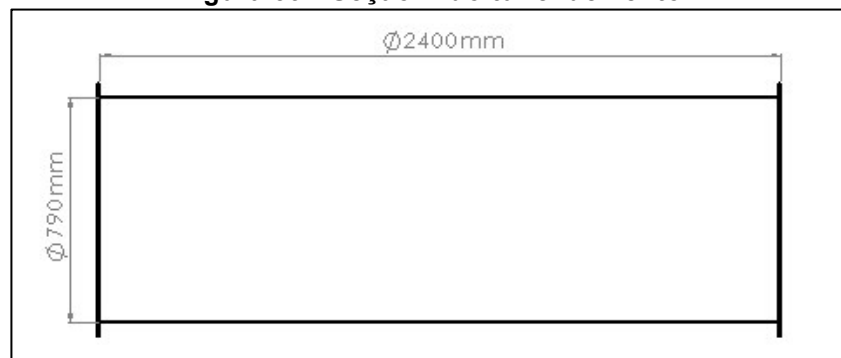
Através das medidas do radiador automotivo de linha pesada e de seu ventilador, pode ser apresentado o túnel de vento, que é parte importante integrante do sistema, esse túnel de vento é fabricado de aço carbono, composto por um diâmetro interno de 790mm e duas seções, sendo a primeira seção de 2400mm de comprimento e a segunda seção de 1600mm. O túnel de vento completo é apresentado na Figura 38 e seccionado nas Figuras 39 e 40 de acordo com as cotas necessárias.

Figura 38 – Representação dos túneis de vento



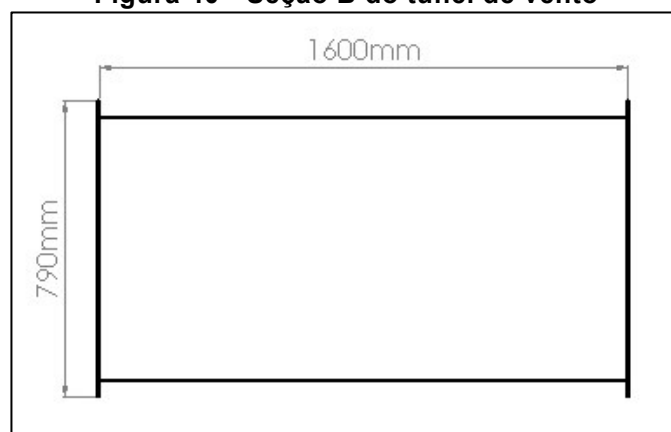
Fonte: Autorial Própria

Figura 39 - Seção A do túnel de vento



Fonte: Autorial Própria

Figura 40 - Seção B do túnel de vento



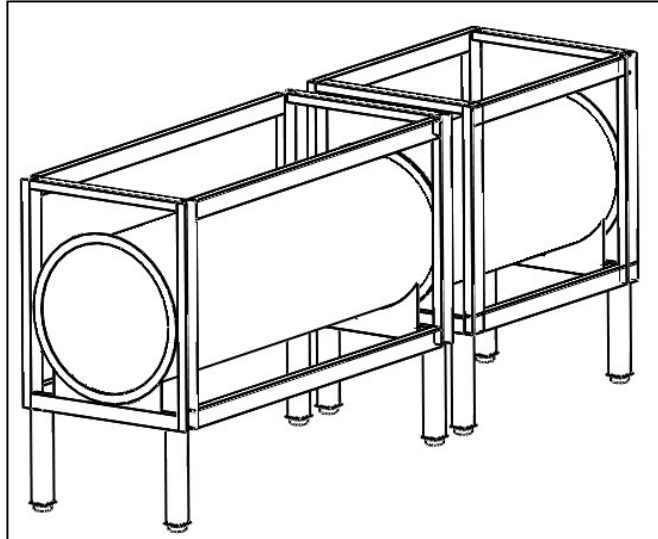
Fonte: Autorial própria

3.1.10 Suportes dos túneis de vento

Com o desenvolvimento do túnel de vento, se torna necessário desenvolver suportes para apoio e sustentação, de tal forma que fiquem alinhados com o restante da bancada estacionária. Primeiro passo é o suporte das seções do túnel de vento,

para isso foi criado um suporte em aço carbono com perfil U e chapas soldadas, representadas pela Figura 41 em visualização 3D, que seguem as dimensões apresentadas nas Figuras 42 respectivo à Seção A e a Figura 43 respectiva à Seção B do túnel de vento.

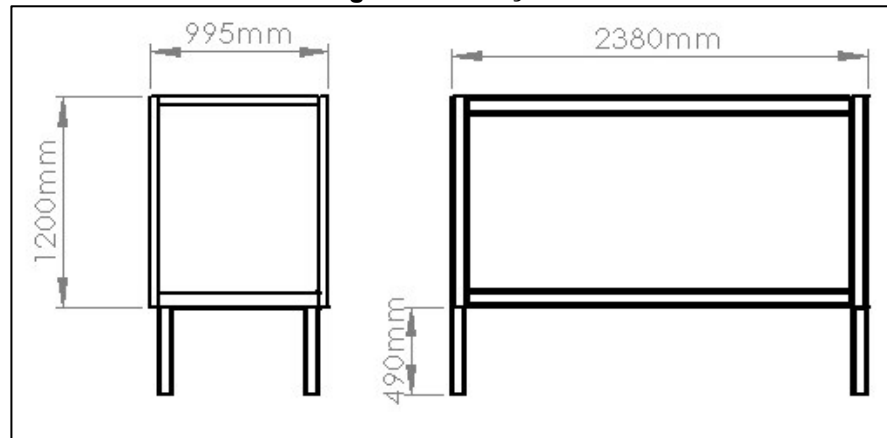
Figura 41 – Representação 3D montagem



Fonte: Autorial Própria

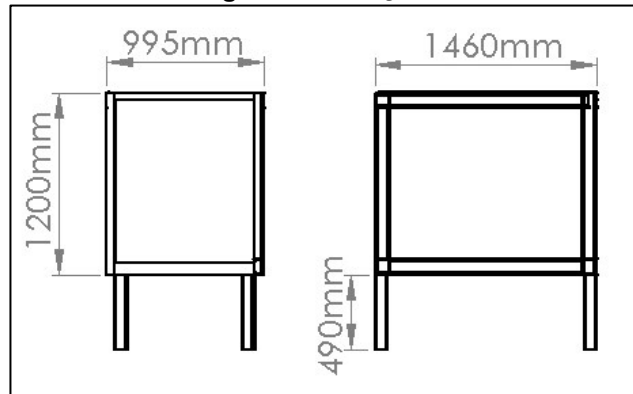
As Figura 42 e 43 mostram as cotas da estrutura de sustentação das seções do túnel de vento, as chapas estruturais são de aço carbono de 2mm de espessura, possuindo dois modelos de perfil, um deles de 100x40mm e outro de 75x40mm.

Figura 42 - Seção A



Fonte: Autorial própria

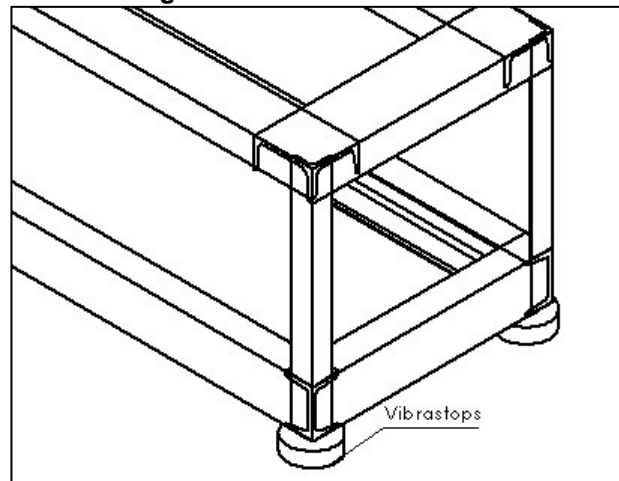
Figura 43 - Seção B



Fonte: Autoria Própria

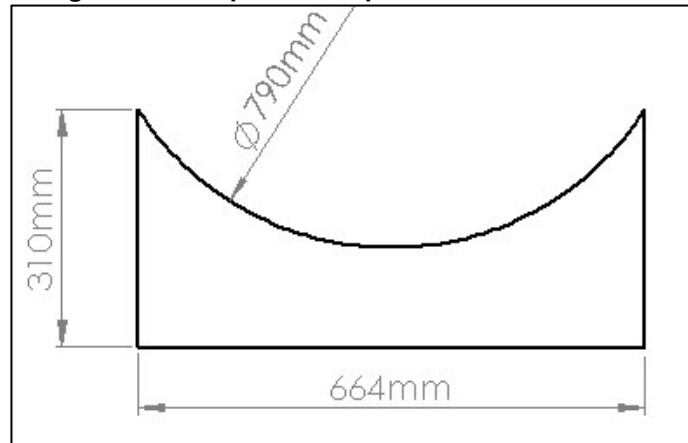
Para os pés da estrutura do túnel de vento, no projeto foi utilizado em cada um, 2 perfis U soldados de 75x40mm para que fiquem em uma geometria retangular, com altura de 495mm. A Figura 44 apresenta com detalhes como ficou a montagem dos pés. Para amortecer os efeitos vibratórios na montagem experimentais, são projetados e instalados amortecedores *vibrastops* na extremidade em contato com o chão.

Figura 44 - Pés da estrutura



Fonte: Autoria Própria

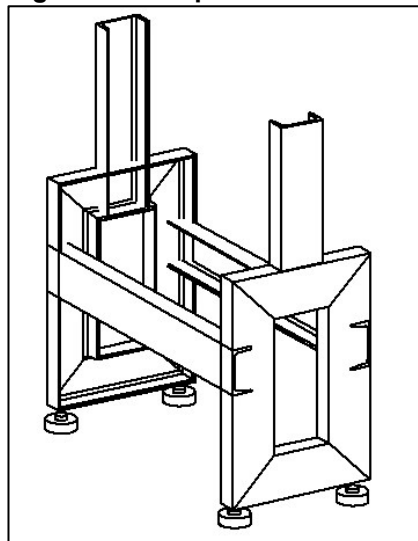
Para um bom encaixe entre o suporte e as seções do túnel de vento, foi utilizado um suporte em formato de meia lua, de modo que fique dentro das medidas do túnel de vento. Também foi utilizado uma chapa de 2mm para projeto – Figura 45.

Figura 45 - Suporte de apoio do túnel de vento

Fonte: Autorial Própria

3.1.11 Suporte do radiador

Para que haja uma excelência na montagem experimental, foi necessário a instalação de um suporte para a fixação do radiador em conjunto com a bancada estacionária, com isso foi projetado um suporte em aço carbono com perfil U de 100x40x2mm, usando o mesmo critério anterior. É importante o uso de dispositivos que mitiguem a vibração causada pelo sistema, com isso foram instalados nas extremidades em contato com o chão do suporte, amortecedores *vibrastops*. Esse suporte do radiador é representado na Figura 46.

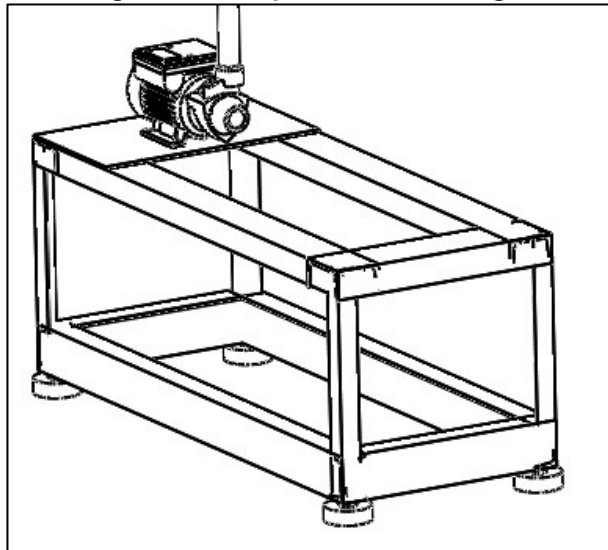
Figura 46 - Suporte do radiador

Fonte: Autorial própria

3.1.12 Suporte bomba hidráulica

Para fixação da bomba hidráulica foi necessária a instalação em uma superfície onde a altura de entrada da bomba estivesse alinhada horizontalmente com a saída do radiador. Considerando o suporte e o radiador montados foi possível dimensionar o suporte da bomba d'água. Toda estrutura foi projetada com perfil U e amortecedores *vibrastops* (Figura 47).

Figura 47 - Suporte bomba d'água



Fonte: Aatoria Própria

3.1.13 Unidade de Aquisição de Dados

Para a coleta de dados será utilizado um sistema de aquisição de dados Keysight™ 34970A (Figura 48), programado para obter os dados através de leituras de pressão do tubo de *Pitot*, e as temperaturas de entrada e saída do radiador, através de termopares Omega Engineering™ do tipo K.

Figura 48 - Sistema de aquisição de dados



Fonte: Keysight (2021)

4 RESULTADOS

Neste capítulo é apresentada a bancada experimental estacionária utilizada para determinação do desempenho térmico de um radiador automotivo de linha pesada. 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) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Ponta Grossa.

4.1 Montagem experimental

Na Fotografia 1 é mostrado o sistema elétrico da bancada estacionária, existem tomadas elétricas para ligação do sistema, onde um circuito elétrico está direcionado ao inversor de frequência (lado esquerdo) que é responsável pelo controle de frequência de funcionamento do motor elétrico. A tomada do lado direito é referente ao circuito elétrico que liga o sistema de aquecimento através de duas resistências elétricas existentes no reservatório de água, assim como um display que mostra a temperatura da água no reservatório.

Fotografia 1 - Montagem elétrica



Fonte: Autoria Própria

Na parte inferior pode ser observado o motor elétrico instalado na lateral do suporte do túnel de vento. Esse motor foi descrito anteriormente na metodologia desse TCC e é responsável por transmitir potência ao sistema acoplado, essa transmissão ocorre por duas correias industriais tipo V através de uma polia dupla de relação 1:1 ao eixo mancal do ventilador instalado dentro da primeira seção do túnel de vento.

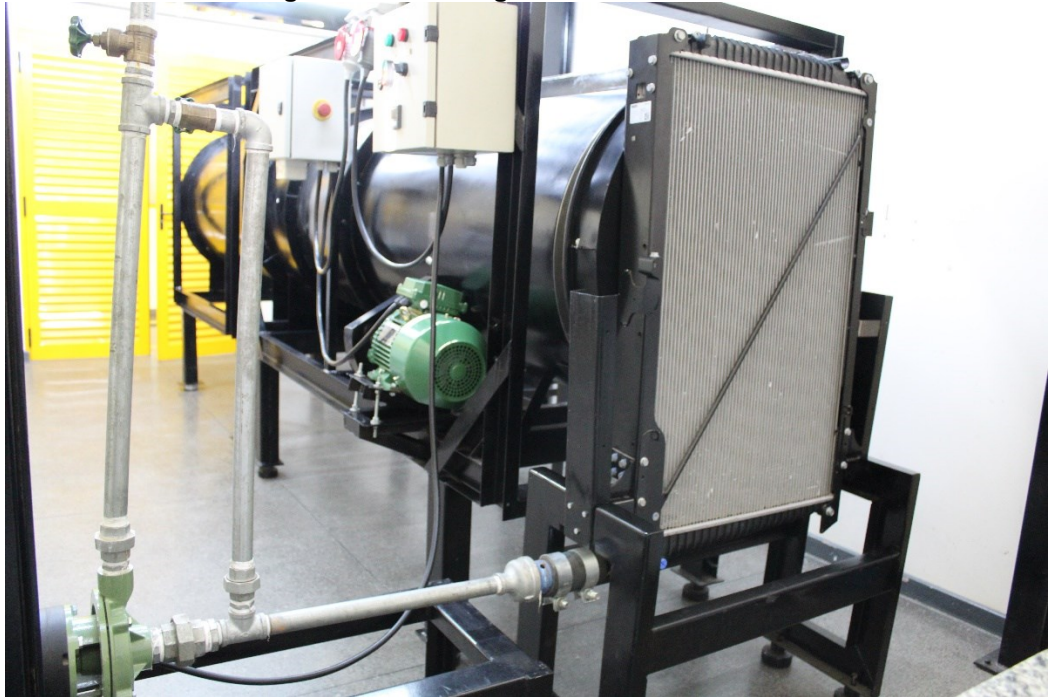
Na Fotografia 2 é mostrada uma visão frontal da bancada experimental estacionária, onde é possível observar o ventilador montado dentro da primeira sessão do túnel de vento. Para uma melhor junção do radiador com o túnel de vento foi utilizado um anel de vedação par evitar perdas no sistema.

Fotografia 2 - Montagem frontal sem radiador



Fonte: Aatoria Própria

Na Fotografia 3 é apresentada uma visão geral da bancada estacionária onde é possível observar o radiador automotivo de linha pesada instalado em seu suporte, onde há a junção com o restante do aparato experimental: túnel de vento e sistema fechado de circulação de água quente. No canto inferior esquerdo pode ser observado visto a bomba hidráulica responsável pela sucção da água arrefecida pelo trocador de calor de escoamento cruzado e retorno ao reservatório de água. Todo sistema de tubulação foi montado com tubos galvanizados *schedule 40*.

Fotografia 3 - Montagem frontal com radiador

Fonte: Autorial Própria

Na entrada e na saída de água do radiador automotivo, existem termopares e transdutores de pressão responsáveis pela coleta das temperaturas de entrada e saída da água bem como da determinação da queda de pressão dentro do trocador de calor. Os termopares utilizados são do tipo K, onde sua faixa de temperatura varia de -200°C à 1200°C , com sensibilidade de $41,0\text{mV}/^{\circ}\text{C}$, sendo sua escala variando de $-6,4\text{mV}$ a $49,0\text{mV}$, sua vantagem entre outros termopares é a resistência à oxidação, devido a junção de cromo-alumínio, sendo o mais barato e popular entre os outros, a facilidade dele dispõe a aplicação em diversos tipos de montagem.

A Fotografia 4 mostra uma imagem do sistema hidráulico da bancada experimental estacionária, pode ser observado a bomba hidráulica com recalque de 1" e a instalação de um sistema by-pass, que consiste em uma maneira de resolver problemas de água e ar no sistema, também é importante, caso o sistema descarregue o escoamento de fluido de volta, a válvula permite evitar essa ação.

Fotografia 4 - Montagem lateral

Fonte: Autorial Própria

Considerando o croqui do projeto da bancada experimental estacionária de um radiador automotivo de linha pesada apresentado inicialmente, tem-se o reservatório de água para alimentação de fluido a ser arrefecido do sistema, através da tubulação de entrada, transportará a água aquecida através de resistências elétricas, o controle do aquecimento é feito através de um controlador PID existente em painel de controle do sistema elétrico. Como mencionado anteriormente, esse reservatório de água está em um nível elevado do chão. Ele foi montado em uma estrutura metálica acoplada a um mezanino metálico interno, como mostrado na Fotografia 5 é visto um corte da montagem do mezanino, o primeiro andar conta com uma área onde é possível realizar estudos ou outras atividades, o segundo andar da estrutura metálica interna é a parte onde é suportada o reservatório de água, lembrando que todo acesso deve ser feito através de uma escada. Destaca-se que toda estrutura do mezanino metálico foi fabricada de acordo com os materiais apresentados na metodologia, constituído de aço carbono, através de solda e montagens de perfis U, perfis I e chapas. De acordo com a NR12, todas montagens necessitam de proteções fixas, como gaiola de escadas, corrimãos e sistemas de guarda-corpo e rodapé, onde haja algum risco de queda. Toda sinalização de segurança deve ser sinalizada na cor amarela.

Fotografia 5 - Montagem superior com vista mezanino



Fonte: Aatoria Própria

No túnel de vento foi realizada furações para a fixação dos quatro tubos de *Pitot* visando a aquisição de dados do escoamento de ar que é gerado através do acionamento do ventilador no interior do mesmo após a passagem do ar atmosférico em escoamento cruzado sobre o radiador automotivo, as posições foram realizadas de acordo com a Figura 27. Na Fotografia 6 é mostrada uma fotografia da vista lateral do túnel de vento.

Fotografia 6 -Montagem lateral da bancada experimental



Fonte: Aatoria Própria

5 CONCLUSÃO

Neste Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica foi realizado a descrição de uma bancada estacionária para determinação experimental do desempenho térmico de um radiador automotivo de linha pesada existente no Laboratório de Meios Porosos e Eficiência Energética (LabMPEE) vinculado ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa.

Vê-se uma necessidade de compreender melhor o funcionamento de motores a combustão e a respeito do sistema de arrefecimento, tão importante para manter o conjunto funcionando de forma correta, todo esse estudo é importante para entender o motivo de alguns componentes serem utilizados em automóveis de linha pesada.

Todos os objetivos foram alcançados com esse Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), devido que, a descrição deste trabalho contribui para desenvolvimento de projetos similares a uma bancada experimental estacionária, o projeto tem grande relevância para ser utilizado como base de estudos para outros alunos que desejam estudar sobre transferência de calor. Com essa bancada experimental, vários testes podem ser realizados, como por exemplo, o próprio estudo de desempenho térmico de um radiador, além de análises do fluxo de ar de entrada e saída do dispositivo, assim como diagnósticos de temperatura do sistema.

Todo trabalho desenvolvido abre portas para outros alunos utilizarem a bancada como um laboratório para práticas e também sugestões de melhoria nos dispositivos utilizados.

Esse aparato experimental, financiado com recursos próprios do DAMEC/UTFPR/PG, foi desenvolvido para se tornar versátil e de fácil operação, visando a realização de experimentos didáticos e de pesquisa científica, desenvolvimento tecnológica e de inovação, contribuindo para os cursos de graduação e pós-graduação *campus* a partir da obtenção de conhecimentos práticos acerca de conteúdos que até o momento da formação dos estudantes eram apenas vistos na teoria.

REFERÊNCIAS

- ACDELCO. Disponível em: <https://www.acdelcobrasil.com.br/produtos/bomba-dagua.aspx>. **Bomba d'água**. Acesso em: 30 set. 2020.
- ALLPARTSNET. Disponível em: <https://www.allpartsnet.com.br/camisa-motor-takao-chevrolet-tracker-2-0-8v-turbo-diesel-2000-2001-bloco-rf-mazda-cmgm0022/p>. **Camisa do motor**. Acesso em: 30 set. 2020.
- BARLOW, J. B., RAE W. H. JR, E POPE A., **Low-speed Wind Tunnel Testing**. 3a Ed, Wiley, 1999.
- BARROS, José Eduardo Mautone et al. **Estudo da transferência de calor em motores**. Disponível em: http://www.mautone.eng.br/apostilas/laboratorio_termica/TransferenciaCalor_Teoria.pdf. Acesso em: 22 set. 2020.
- BEJAN, Adrian. **Transferência de Calor**. São Paulo: Edgar Blucher, 2004.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 12 – Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. Brasília: Ministério do Trabalho e Previdência, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/norma-regulamentadora-no-12-nr-12>. Acesso em 20 nov. 2021.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**. São Paulo: Blucher, 2012. 553 p. Disponível em: <https://vdocuments.com.br/motores-de-combustao-interna-franco-brunetti-vol-1.html>. Acesso em: 20 set. 2020.
- CARL, Matthew; GUY, Dana; LEYENDECKER, Brett; MILLER, Austin; FAN, Xuejun. **The theoretical and experimental investigation of the heat transfer process of an automobile radiator**. Department of Mechanical Engineering. Lamar University. Beaumont. 12p, April 2012. Disponível em: <https://www.coursehero.com/file/25920158/No-31-2012-ASEE-Radiator-Finalpdf/>. Acesso em: 20 set. 2020.
- ÇENGEL, YUNUS A & GHAJAR. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem pratica**. 3. ed. São Paulo, SP: McGraw-Hill, 2012. 902p.
- DISTRIBUIDORA APS. Disponível em: <http://www.apsdistribuidora.com.br/produtos/RADIADOR-DE-AGUA/RADIADOR-DE-AGUA-GM---CHEVROLET+MAGNETI-MARELLI+RMM1132GM>. **Radiador de água**. Acesso em: 30 set. 2020.
- HOSSAIN, Abul K. et al. **Effects of Engine Cooling Water Temperature on Performance and Emission Characteristics of a Compression Ignition Engine Operated with Biofuel Blend**. Journal Of Sustainable Development Of Energy, Water And Environment Systems. United Kingdom, p. 46-57. mar. 2017.
- HOSSAIN, Abul K. et al. **Effects of Engine Cooling Water Temperature on Performance and Emission Characteristics of a Compression Ignition Engine**

Operated with Biofuel Blend. Journal Of Sustainable Development Of Energy, Water And Environment Systems. United Kingdom, p. 46-57. mar. 2017. Disponível em: <http://www.sdewes.org/jsdewes/dp1b0a57c1099cd16d65e5ca0c4f88671c6c516e99>. Acesso em: 14 set. 2020.

ISKANDAR, Marco Antonio. **Análise e projeto de um sistema de controle de arrefecimento de um motor Diesel, visando à redução das emissões e consumo de combustível.** 2011. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/264902/1/Iskandar_MarcoAntonio_M.pdf. Acesso em: 24 set. 2020.

JIS (Japanese Industrial Standard). JIS D-1614: **Radiator for automobiles** – Test method of heat dissipation. Japan, 1999.

KUPPAN, T. **Heat Exchanger designer handbook.** 2 ed. Nova York: CRC Press, 2013.

MACHADO FILHO, Marcelo Correa. **Concepção de um túnel aerodinâmico do tipo sucção com retorno aberto.** 2014. 151 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

MACHADO FILHO, Marcelo Correia. **Concepção e avaliação experimental de uma bancada estacionária para a análise do rendimento térmico de radiadores de veículos pesados.** 2021. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

MARTINELLI JUNIOR, Luiz Carlos. **MÁQUINAS TÉRMICAS I:** motores de combustão interna. Panambi: Unijuí, 2000. 83 p. Disponível em: <http://martinelli.eng.br/ebooks.htm>. Acesso em: 25 set. 2020.

MEHTA, R,D, **The Aerodynamic Design of Blower Tunnels with Wide Angle Diffusers.** Prog Aerospace Sci 18 (1977).

PÁBON, N.Y.L. **Projeto e fabricação de um túnel de vento e Caracterização térmica de um radiador Automotivo.** 306 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

PEÇA, José Oliveira. **MOTOR DIESEL:** sua aplicação em equipamentos agrícolas. Portugal: Universidade de Évora, 2019. 120 p. (Apontamentos para uso dos Alunos). Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/27189>. Acesso em: 22 set. 2020.

PRADO, Wesley Bolognesi. **Simulação do sistema de arrefecimento de motores diesel em Matlab-Simulink.** 2006. 96 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2006. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18135/tde-11022016-112753/pt-br.php>. Acesso em: 20 set. 2020.

ROCHAPEÇAS. Disponível em: <https://rochapeças.com.br/motor/helices/helice-ventoinha-radiador-com-aro-08-pas-704mm-iveco-eurotech-eurotrkker-powerstar-99450016>. **Ventilador para sistema de arrefecimento**. Acesso em: 30 set. 2020.

SARAN, D.J., ALVES, T.A., SALVIANO, L.O., JARDIM, M.F., WOISKI, E.R., MANSUR, S.S. & VIEIRA, E.D.R. **Construção de um Túnel Aerodinâmico do Tipo Soprador em Material Acrílico**. Anais do X Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica (em CD-ROM), 2 p., Santos, SP, 2003.

SHAH, Ramesh K.; SEKULIC, Dusan P.. **Fundamentals of heat exchanger design**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 976 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=beSXNAZbIWQC&printsec=frontcover&hl=pt-BR#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 21 set. 2020.

TILLMANN, Carlos Antonio da Costa. **Motores de Combustão Interna e seus Sistemas**. Pelotas: Rede E-Tec Brasil, 2013. 166 p. Disponível em: http://estudio01.proj.ufsm.br/cadernos/ifsul/tecnico_biocombustivel/motores_combustao_interna_e_seus_sistemas.pdf. Acesso em: 20 set. 2020.

TILLMANN, C. A. DA C. **Motores de combustão Interna e seus Sistemas**. Pelotas: [s.n].

VARELLA, Carlos Alberto Alves *et al.* **Noções Básicas de Motores Diesel**. Seropedica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2010. 45 p. Disponível em: http://www.ufrjr.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Literatura/No%20E7%F5es%20B%E1sicas%20de%20Motores%20Diesel.pdf. Acesso em: 10 set. 2020.

VARELLA, Carlos Alberto Alves. **PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**. Seropedica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2012. 30 p. Disponível em: http://ufrjr.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/apresenta/principios%20de%20funcionamento%20dos%20motores.pdf. Acesso em: 15 set. 2020.