

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CAIO CÉSAR PANTALEÃO MONTEIRO

**PROJETO DE UM SISTEMA DE AFERIÇÕES DE BAIXO CUSTO PARA PARÂMETROS
TERMODINÂMICOS DE UMA BANCADA DINAMOMÉTRICA**

MANAUS

2021

CAIO CÉSAR PANTALEÃO MONTEIRO

**PROJETO DE UM SISTEMA DE AFERIÇÕES DE BAIXO CUSTO PARA PARÂMETROS
TERMODINÂMICOS DE UMA BANCADA DINAMOMÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia – EST da Universidade do Estado do Amazonas – UEA como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Wilson Aguiar da Cruz

MANAUS

2021

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

M775p Monteiro, Caio César Pantaleão
Projeto de um sistema de aferições de baixo custo para parâmetros termodinâmicos de uma bancada dinamométrica / Caio César Pantaleão Monteiro. Manaus : [s.n], 2021.
69 f.: color.; 30 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Mecânica -
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2021.
Inclui bibliografia
Orientador: Dr. Ricardo Wilson Aguiar da Cruz

1. Motor de combustão interna. 2. Sistema de aferição.
3. Dinamômetro. 4. Arduino. I. Dr. Ricardo Wilson Aguiar da Cruz (Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Projeto de um sistema de aferições de baixo custo para parâmetros termodinâmicos de uma bancada dinamométrica

Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463

CAIO CÉSAR PANTALEÃO MONTEIRO

**PROJETO DE UM SISTEMA DE AFERIÇÕES DE BAIXO CUSTO PARA PARÂMETROS
TERMODINÂMICOS DE UMA BANCADA DINAMOMÉTRICA**

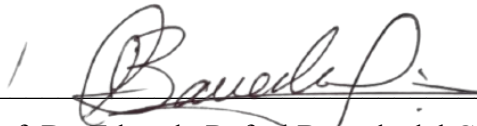
Este trabalho de conclusão de curso foi considerado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e aprovado em sua forma final pela comissão examinadora.

Manaus, 16 de julho de 2021.

Banca examinadora:



Orientador: Prof. Dr. Ricardo Wilson Aguiar da Cruz



Prof. Dr. Eduardo Rafael Barreda del Campo



Prof. Rubelmar Maia de Azevedo Cruz Neto

Dedico este trabalho de curso a minha mãe,
Cleidiana Costa Pantaleão, e meu pai, Nilo Gomes
Monteiro, pelo carinho e amor dedicado, pois a cada
degrau por mim alcançado e em todas as minhas
conquistas estiveram sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Para elaboração e apresentação deste trabalho várias pessoas me ajudaram e me apoiaram de forma incondicional, e agradecer é o mínimo que eu posso fazer para demonstrar minha gratidão. Então, agradeço, primeiramente ao senhor meu Deus todo poderoso, por estar sempre comigo me dando a força necessária para seguir sempre pelo caminho correto e honesto e concedendo a graça de todas as realizações que tenho concluído ao longo da vida.

Agradeço também aos meus familiares, obrigados a conviver e me apoiar com as tensões, incertezas, angústias, momentos de frustração e de desânimo, sucedendo-se ao longo de meses e meses de estudo, e, por certo, afetando-os de algum modo. A eles dedico a minha alegria por chegar ao fim deste percurso.

Agradeço ainda a todas as pessoas e entidades que contribuíram para que eu pudesse desenvolver e concluir este trabalho. E foram muitos os que, de alguma forma, direta ou indireta, deram essa contribuição. Não posso me furtar a registrar o meu agradecimento aos professores de Engenharia Mecânica, especialmente a: Antonio Cláudio, Arlindo Pires, Eduardo Barreda e Ricardo Cruz, a todos os funcionários e a Coordenação e aos meus colegas de curso, especialmente a: Camila Stephanie, Chaeny Amorim, Hirla de Cássia, Joyce Pontes, Sanches Ismael, Wiguison Gabriel e Priscila Moreira, com os quais pude estabelecer uma convivência pessoal e intelectual ao longo de todo esse tempo.

Agradeço ainda a todas as pessoas que, na UEA, tornaram possível que eu pudesse fazer esse curso e realizar o meu trabalho de pesquisa.

A todos estes (e a todos aqueles que, por falha minha, não foram mencionados) o meu muito obrigado.

“Os maiores momentos da história científica têm surgido, e sempre surgirão, quando uma nova explicação, talvez junto com novos resultados da observação, produz uma mudança sísmica em nossas conclusões sobre o funcionamento da natureza”

(Neil deGrasse Tyson)

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de aferições de baixo custo, com base no Arduíno e alguns sensores, para parâmetros termodinâmicos de uma bancada dinamométrica. Propriedades importantes dos motores de combustão interna, como testes e análises de desempenho, e uma perspectiva histórica a respeito do uso dos mesmos na atualidade são destacados, visto também que as preocupações ambientais sobre o uso sustentável dos recursos têm aumentado consideravelmente. O sistema dinamométrico experimental consiste em um motor de combustão interna acoplado a elementos que permitam a verificação de torque e potência ao freio. Busca-se através do sistema projetado, além de sua viabilização e construção, verificar a possibilidade de se medir o consumo específico de combustível e de se realizar balanços energéticos e exergéticos.

Palavras-chave: Motor de combustão interna. Sistema de aferição. Dinamômetro. Arduíno.

ABSTRACT

This work presents the development of a low-cost gauging system, based on Arduino and some sensors, for thermodynamic parameters of a dynamometric bench. Important properties of internal combustion engines, such as performance tests and analyses, and a historical perspective regarding their current use are highlighted, as environmental concerns about the sustainable use of resources have increased considerably. The experimental dynamometric system consists of an internal combustion engine coupled to elements that allow the verification of torque and power to the brake. Through the projected system, in addition to its feasibility and construction, the aim is to verify the possibility of measuring the specific consumption of fuel and of carrying out energy and exergy balances.

Keywords: Internal combustion engine. Gauging system. Dynamometer. Arduino.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Versão inicial da bancada dinamométrica da EST/UEA.....	26
Figura 2: Classificação das máquinas térmicas.....	28
Figura 3: Mecanismo cilindro pistão.....	32
Figura 4: Nomenclatura de diversos componentes de um motor de combustão interna.....	32
Figura 5: Representação das forças atuantes nas partes móveis de um motor alternativo.....	34
Figura 6: Curvas de desempenho de um motor.....	37
Figura 7: Freio dinamométrico.....	40
Figura 8: Freio de Prony: Freio dinamométrico de fricção.....	41
Figura 9: Representação de um motor como volume de controle.....	43
Figura 10: Arduíno Uno R3.....	48
Figura 11: Motor Branco B4T – 5.5 HP.....	51
Figura 12: Da esquerda para a direita: Alavanca, sistema de frenagem, balança e tacômetro..	52
Figura 13: Esboço do sistema dinamométrico mecânico.....	52
Figura 14: Representação inicial de elaboração do projeto.....	55
Figura 15: Representação do aparato proposto para contornar a falta de um sensor de fluxo líquido.....	56
Figura 16: Esquema eletrônico desenvolvido no projeto.....	58
Figura 17: Gráfico de correlação entre tensão de saída e quantidade de ar medido no MAF..	60
Figura 18: Curva gerada pela equação 11.....	61
Figura 19: Instalação dos sensores MAF.....	64
Figura 20: Instalação do sensor termopar de alta temperatura e módulo MAX6675.....	65
Figura 21: Sensores DS18B20, local de instalação no corpo do motor.....	65
Figura 22: Elementos eletrônicos acomodados em caixa plástica adaptada.....	66
Figura 23: Tela LCD apresentando dados lidos dos sensores.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Recursos financeiros necessários para realização do projeto.....	63
Tabela 2: Dados obtidos no software Engauge Digitzer.....	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Nomenclatura de diversos componentes de um motor de combustão interna.....	33
Quadro 2: Descrição do motor Branco B4T – 5.5 HP.....	51
Quadro 3: Levantamento inicial de recursos materiais necessários para realização do projeto.	53
Quadro 4: Recursos materiais utilizados na elaboração do projeto.....	63

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	22
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO E HIPÓTESES.....	23
1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	23
1.3 OBJETIVOS.....	24
1.3.1 Geral.....	24
1.3.2 Específicos.....	24
1.4 JUSTIFICATIVA.....	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA ALTERNATIVOS.....	27
2.1.1 Perspectiva Histórica.....	28
2.1.2 Classificações.....	30
2.1.3 Principais componentes.....	31
2.1.4 Parâmetros de desempenho.....	33
2.1.4.1 Torque.....	34
2.1.4.2 Potência.....	35
2.1.4.3 Consumo específico de combustível.....	36
2.1.4.4 Cvas características de desempenho.....	37
2.2 TESTES DE MOTORES.....	38
2.3 ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA.....	41
2.3.1 Balanço de massa.....	43
2.3.2 Balanço de energia.....	44
2.3.3 Balanço de exergia.....	45
2.4 ARDUÍNO.....	46
2.5 SENSORES DE TEMPERATURA E VAZÃO.....	48
2.5.1 Sensores de temperatura.....	48
2.5.2 Sensores fluxos em massa de ar eletrônicos.....	49
2.5.3 Sensores de fluxo para líquidos.....	50
3 METODOLOGIA.....	50

3.1 DESCRIÇÃO BANCADA DE TESTE ANTES DA REALIZAÇÃO DO PROJETO.....	50
3.2 PROCEDIMENTOS ELABORAÇÃO E PROPOSTA INICIAL DE MONTAGEM.....	52
3.3 PROCEDIMENTOS DE MONTAGEM DO SISTEMA DE AFERIÇÕES.....	57
3.3.1 Procedimento de elaboração e montagem dos componentes eletrônicos.....	57
3.3.2 Procedimentos de integração dos componentes eletrônicos ao motor.....	59
3.4 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS.....	61
4 RECURSOS.....	62
4.1 RECURSOS MATERIAIS.....	63
4.2 RECURSOS FINANCEIROS.....	63
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	64
5.1 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA.....	64
5.2 PROBLEMAS OCORRIDOS NAS PRIMEIRAS TENTATIVAS DE TESTES.....	67
6 SÍNTESE CONCLUSIVA E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
6.1 CONCLUSÃO.....	68
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
APÊNDICE A: CÓDIGO FONTE IMPLEMENTADO NO ARDUÍNO UNO...75	
APÊNDICE B: DADOS OBTIDOS NO SOFTWARE ENGAUGE DIGITIZER.....	77

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta de forma sucinta características e propriedades importantes dos motores de combustão interna, incluindo testes e análises de desempenho, e uma perspectiva histórica a respeito do uso dos mesmos na atualidade, visto que as preocupações ambientais sobre o uso sustentável dos recursos nunca foram tão altas como as de atualmente. As imposições de legislações referentes a emissões de gases poluentes e de efeito de estufa cada vez mais restritas, acompanhado do aumento do custo do petróleo, tem exigido uma renovação nos meios de produção de energia (ALVES, 2013).

A persistência do motor de combustão não pode ser responsabilizada apenas pela inércia do mercado ou pelo poder da indústria do petróleo. Ele é duradouro e domina porque é tão adaptável e versátil. Pequenas versões de aparadores e motosserras para estaleiros. Modelos enormes e altamente eficientes impulsionam escavadeiras e navios de carga. Em um carro, esses motores podem ser configurados como um propulsor econômico e confiável ou dispositivos de corrida de alta velocidade (MAYERSOHN, 2013).

O motor de combustão interna é perfeitamente adequado para o transporte, porque explora um combustível extremamente portátil e denso em energia. Devido a essas características, não se tem substitutos a esses motores para muitas aplicações, é o caso, por exemplo, do transporte naval.

Alves (2013) relata que embora se continue a utilizar massivamente motores de combustão interna como fonte mecânica de propulsão, a utilização de motores elétricos em automóveis tem vindo a ser implementada, representando uma potencial solução para a redução de emissões poluentes, mas que o principal problema é exatamente a autonomia limitada. É necessário ressaltar, porém, que a energia de abastecimento das baterias para veículos elétricos também provem, em grande parte do mundo, da queima de combustíveis fósseis, além da contribuição negativa ao meio ambiente com os processos de produção das mesmas.

Vonbun (2015) relata que uma solução alternativa que une as baixas emissões dos elétricos com a grande autonomia e facilidade de reabastecimento dos veículos a combustão são os veículos híbridos, que podem obter energia tanto de um combustível fóssil quanto de uma rede elétrica. Dessa forma é possível a existência de veículos menos poluentes e economicamente viáveis.

Mayersohn (2013) afirma que os motores são exemplos de sobrevivência através da adaptabilidade, pois são baratos de construir, estão em conformidade com os requisitos de vários combustíveis e layouts físicos e avançou em sintonia com os desenvolvimentos em metalurgia e controle de poluição.

As novas demandas do motor de combustão estão focadas nas emissões, pois há um rico conjunto de oportunidades para melhorar eficiência, que sempre comprometerá as alternativas.

Apresentam-se também tópicos sobre testes em motores de combustão, com ênfase nos dinamômetros de fricção, um breve capítulo introdutório sobre o Arduino, sensores de vazão e temperatura e algumas explicações sobre balanços de energia e exergia, conforme o objetivo que se apresenta a seguir.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO E HIPÓTESES

Para a análise de parâmetros de desempenho termodinâmicos, de que forma se poderia construir um sistema de baixo custo capaz de aferir vazão de entrada de ar e de combustível, temperatura e vazão de saída dos gases de escape em um motor de combustão interna alternativo?

HIPÓTESES:

- Projetando-se um sistema embarcado com Arduino equipado com sensores de vazão e temperatura em locais estratégicos que seja capaz de aferir e mostrar os dados requeridos.
- Com esse sistema embarcado, verifica-se que é possível medir consumo específico de combustível e realizar balanços energéticos e exergéticos.

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Delimita-se o estudo neste trabalho aos temas:

- Motores de combustão interna alternativos;
 - Análise de desempenho em motores de combustão interna;
- Testes de motores;

- Dinamômetros;
- Balanços de energia e exergia aplicados a motores de combustão interna;
- Arduíno;
 - Sensores de vazão e temperatura.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

- Projetar um sistema embarcado com Arduíno, de baixo custo, que visa obter dados experimentais de parâmetros termodinâmicos em um motor de combustão interna alternativo.

1.3.2 Específicos

- Construir tal sistema com o mínimo impacto possível na estrutura original do motor;
- Verificar a possibilidade da medição do consumo específico de combustível;
- Verificar a possibilidade da realização de balanços de energia e de exergia.

1.4 JUSTIFICATIVA

É verdade que desde a antiguidade o homem vive em busca de criar dispositivos e equipamentos que sejam capazes de realizar trabalho, fazendo com que se diminua a participação humana direta no mesmo. Um dos resultados dessa incessante busca são os motores de combustão interna alternativos. Segundo Brunetti (2013) e Pulkrabek (2004) esses motores são máquinas térmicas capazes de transformar o calor proveniente de uma combustão (a energia química de um combustível, a partir da queima de uma mistura ar combustível) em trabalho mecânico. Esses motores são amplamente empregados em setores industriais, energéticos, de transportes, agrícola, dentre diversos outros.

Para a realização de um estudo experimental nestes motores, vários parâmetros descritivos e característicos em relação ao desempenho dos mesmos precisam ser contemplados (de modo mais básico se pode citar, por exemplo: potência, torque e consumo específico de com-

bustível). Estes parâmetros, além de fornecer as informações sobre o funcionamento desses motores, podem gerar informações características de desempenho e eficiência dos mesmos.

O dinamômetro é por excelência um dos principais instrumentos que servem para medir a força aplicada por um sistema ou por um objeto. Segundo Kich (2011) os dinamômetros são capazes de medir a potência e o trabalho executado em motores, freios, eixos, etc. Além disso, existem dinamômetros especificamente equipados também para avaliação parâmetros energéticos, como o consumo específico, balanços de energia e de exergia.

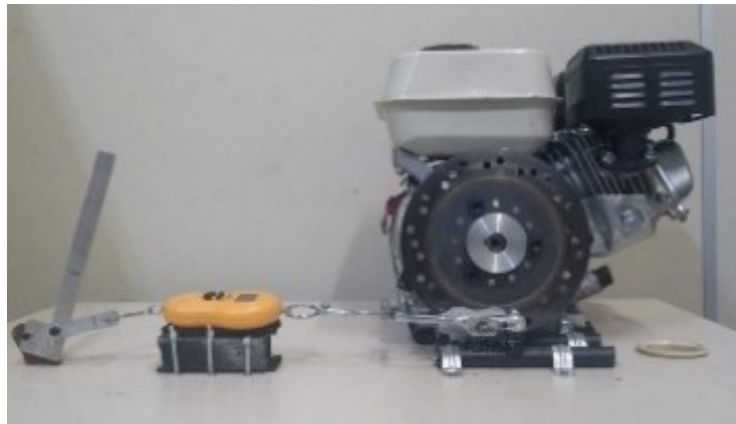
Muito além de avaliação de parâmetros, para garantir o desempenho eficiente dos motores de combustão interna é necessário monitorar parâmetros de operação, como temperatura de entrada de ar, densidade, pressão, massa de ar admitida, dentre outros (KOHUT, 2017). Hatch (2009) explica, por exemplo, que para cada conjunto de parâmetros existe uma quantidade específica de combustível que deve ser injetada para garantir a queima completa e se obter a máxima eficiência, diminuindo a possibilidade de sobrar combustível não vaporizado ou hidrocarbonetos não queimados.

As máquinas térmicas são conhecidas mundialmente como uma das representações fidedignas dos conhecimentos que abrangem a carreira de engenharia mecânica, significando dizer que, dentre as especialidades de um engenheiro mecânico, o conhecimento sobre o funcionamento dos motores de combustão interna merece destaque. Partindo dessa realidade, construiu-se na Escola Superior de Tecnologia – UEA, com a colaboração de alunos e professores, uma bancada dinamométrica que é capaz de avaliar torque e potência, objetivando complementar a formação dos engenheiros mecânicos em relação ao conhecimento do funcionamento dos motores de combustão interna.

A motivação para realização deste trabalho parte da necessidade de análise dos parâmetros de consumo específico, balanços energéticos e exergéticos da bancada dinamométrica do laboratório de ciências térmicas da EST/UEA. A figura 1 a seguir mostra uma fotografia dessa bancada.

Rigon, 2018, ressalta que sensores automotivos e sistemas de controle eletrônico de motores são equipamentos com alto custo agregado. Este projeto seria uma alternativa mais acessível em relação aos equipamentos presentes hoje no mercado.

Figura 1: Versão inicial da bancada dinamométrica da EST/UEA.



O capítulo 3 mostra maiores detalhes sobre a bancada da figura 1.

O objetivo deste trabalho é projetar e construir um sistema embarcado com Arduino, de baixo custo, que visa obter dados experimentais da vazão de entrada de ar e de combustível, temperatura e vazão de saída dos gases de escape no motor da bancada dinamométrica do laboratório de ciências térmicas da EST/UEA para análise da viabilidade de medição do consumo específico de combustível e da realização de balanços energéticos e exergéticos.

Apesar de contemplar apenas a captação de dados, essa função é de extrema importância para o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento de motores, além de promover um grande auxílio didático para análises termodinâmicas (RIGON, 2018).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Apresenta-se neste capítulo alguns estudos em forma de revisão teórica relativo aos principais elementos que compõem a bancada dinamométrica contida no laboratório de ciências térmicas da EST/UEA e ao que é necessário para a elaboração do sistema proposto no projeto.

Inicia-se com um estudo sobre os motores de combustão interna. Neste estudo, apresentam-se uma breve perspectiva histórica, a constituição básica dos mesmos, parâmetros de desempenho e testes de motores. Em seguida, apresentam-se também sobre a aplicação de ba-

lancos de energia e de exergia em motores e um breve estudo sobre o Arduíno e seus periféricos, já que este será especificamente utilizado no projeto.

Ressaltam-se que os elementos apresentados aqui terão ênfase de acordo com a estrutura de construção da bancada dinamométrica contida no laboratório de ciências térmicas da EST/UEA, vide figura 1.

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA ALTERNATIVOS

De acordo com Tillman (2013), define-se motor como uma máquina destinada a converter qualquer forma de energia térmica, elétrica, hidráulica, química e outras, em energia mecânica.

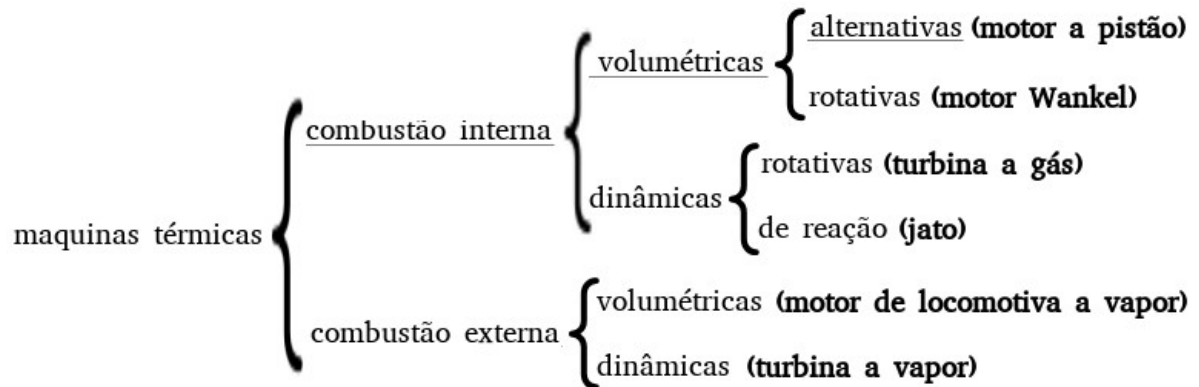
O motor de combustão interna é uma máquina térmica, que transforma a energia proveniente de uma reação química em energia mecânica (HAICAL, 2009). A energia térmica provém da combustão de uma mistura combustível comburente libertando-se, deste modo, a energia química contida no combustível (MARTINS, 2006). Nesse caso, o combustível é o fluido ativo e o ar é um fluido necessário à combustão, os dois são misturados e se efetua a queima dentro do próprio motor (HAICAL, 2009).

Após a queima, a liberação da energia em forma de calor eleva a temperatura da mistura, fazendo os gases no interior do motor se expandirem e, assim, realizarem trabalho. A mistura ar-combustível passa por mudança na sua composição após a combustão, tornando-se no fim gases chamados de produtos da combustão (HAICAL, 2009).

Conforme Martins (2006), os motores de combustão interna alternativos são máquinas volumétricas, das quais se dividem em alternativas e rotativas.

A figura 1 apresenta a uma melhor perspectiva de classificação das máquinas térmicas e alguns exemplos de construções das mesmas.

Figura 2: Classificação das máquinas térmicas.



Fonte: Adaptado de Martins, 2006.

De acordo com Pulkrabek (2004) os motores de combustão interna alternativos são muito versáteis, tendo uma vasta gama de aplicações. Existem muitos fabricantes diferentes de motores (passado, presente e futuro) que produzem e produziram motores que diferem em tamanho, geometria, estilo e características de operação, dado que nenhum limite absoluto pode ser estabelecido para quaisquer características de um motor (tamanho, número de cilindros, cursos em um ciclo, etc.)

2.1.1 Perspectiva Histórica

De acordo com Ferguson e Kirkpatrick (2016), os motores a combustão interna foram desenvolvidos com sucesso no final do ano 1860, sendo considerado uma das invenções mais significativas e que tiveram um impacto significativo na sociedade, especialmente na mobilidade humana.

Embora muito significativo, busca-se atualmente por substitutos para os motores a combustão. Dentre os principais fatores motivantes estão os danos ambientais relacionados a emissão de poluentes e a previsível extinção do petróleo futuramente.

Junior e Barbosa (2012) acreditam que as preocupações com emissões de poluentes e a independência com relação a fontes de energia podem acelerar a substituição dos motores a combustão. Moran, et al. (2013) relata que observadores preveem que nos próximos 50 anos, muito do petróleo que ainda resta será consumido, o que implicará declínio na produção e alta de preços, representando um desafio a ser superado pela sociedade.

Apesar disso, Grande (2018) aponta que soluções técnicas inovadoras vão tornar os motores a combustão interna ainda mais limpos e eficientes que os padrões atuais, prolongando assim sua aplicação nos diferentes tipos de veículos. O desenvolvimento da indústria do petróleo e as leis que regulam a emissão dos poluentes são igualmente responsáveis pela evolução verificada nos dias atuais (JUNIOR e BARBOSA, 2012).

De fato, Ferguson e Kirkpatrick (2016) afirma que a eficiência dos motores deve continuar crescendo, muito devido as legislações e a necessidade de redução do custo de operação, entre outros fatores.

Fischer et al. (2007) e Halsnaes et al (2007), citados por Barczak e Duarte (2012) afirmam que a adoção de combustíveis e tecnologias limpas e as melhorias na eficiência energética das máquinas apresentam grande potencial de redução de emissões de poluentes, além de lançarem bases para alterações nos processos produtivos e no consumo final de energia.

Evidentemente, os motores a combustão interna são intensivamente utilizados em diversas aplicações atualmente e, infelizmente, eles ainda são insubstituíveis para muitas aplicações até o presente momento. Acrescenta-se que os motores a combustão interna ainda possuem ampla vantagem em relação a rede de abastecimento consolidada (JUNIOR e BARBOSA, 2012).

Devido a isso, as principais fabricantes de motores têm realizado grandes esforços em estudos buscando mitigar os fatores negativos relacionados ao uso dos mesmos, como a melhoria da eficiência térmica, a redução de ruídos e vibrações e a redução de emissão de poluentes (FERGUSON E KIRKPATRICK, 2016).

Além disso, Calviti (2008) relata que a acirrada competição entre os fabricantes de veículos tem impulsionado a demanda por melhorias contínuas e importantes nos motores. São elas:

- Aumento do desempenho (torque e potência);
- Redução do consumo de combustível;
- Redução do nível de ruído e vibrações (visando conforto);
- Aumento da confiabilidade ao longo da vida útil do motor;
- Redução do custo do produto (preço de venda);
- Redução do custo de manutenção;
- Redução do tamanho do motor;
- Redução do peso do motor;

- Redução da potência de atrito e perdas mecânicas.

2.1.2 Classificações

De acordo com Tillman (2013), Brunetti (2012) e Martins (2006), os motores de combustão interna alternativos podem ser classificados de acordo com várias características. Apresentam-se aqui as principais características relacionadas ao motor de combustão interna alternativo.

- De acordo com a utilização:
 - Estacionários – utilizado em máquinas estacionárias que operam em rotações constantes;
 - Industriais – utilizado em máquinas agrícolas e de construção civil;
 - Veiculares – utilizado em acionamento de veículos de transporte em geral;
 - Marítimos – utilizado em acionamento de barcos e máquinas de uso naval.
- De acordo com o tipo de ignição (ou quanto ao ciclo de operação):
 - Ignição por faísca (ciclo Otto) – admite-se mistura ar combustível, ignição feita por vela de ignição;
 - Ignição por compressão (ciclo Diesel) – admite-se apenas ar, ignição feita por compressão.
- De acordo com o número de tempos do ciclo de operação:
 - Dois tempos – uma volta por ciclo completo;
 - Quatro tempos – duas voltas por ciclo completo;
 - Outros – idealizações em desuso.
- De acordo com o número de cilindros:
 - Monocilíndricos – apenas um cilindro;
 - Policilíndricos – vários cilindros.
- De acordo com a disposição dos cilindros:
 - Em linha – arranjo de cilindros em linha;
 - Em V – arranjo de cilindros em duas linhas em um mesmo eixo (V);
 - Em W – arranjo de cilindros em três linhas em um mesmo eixo (W);
 - Opostos – cilindros organizados em ângulo de 180°;
 - No mesmo eixo (boxer);

- Com diferentes eixos.
 - Radiais (em estrela) – arranjo de cilindros em forma de estrela, de três a nove cilindros;
 - Outros – idealizações em desuso.
- De acordo com o sistema de resfriamento
 - A ar – simples e de baixa eficiência;
 - A água – mais complexo e de boa eficiência
- De acordo com o sistema de abertura de válvulas
 - OHV – OverHead Valve (comando de válvulas fora do cabeçote);
 - OHC – OverHead Camshaft (comando de válvulas no cabeçote)
 - DOHC – Double OverHead Camshaft (comando de válvulas duplo no cabeçote)
- De acordo com o sistema de alimentação de ar
 - Aspiração natural;
 - Com compressor mecânico;
 - Com turbo compressor.

O motor da bancada do laboratório de ciências térmicas da EST/UEA possui a seguinte descrição: é estacionário, o sistema de ignição é por faísca (Otto), é quatro tempos, é monocilíndrico, possui refrigeração a ar, o sistema de abertura de válvulas é OHV e a aspiração é natural.

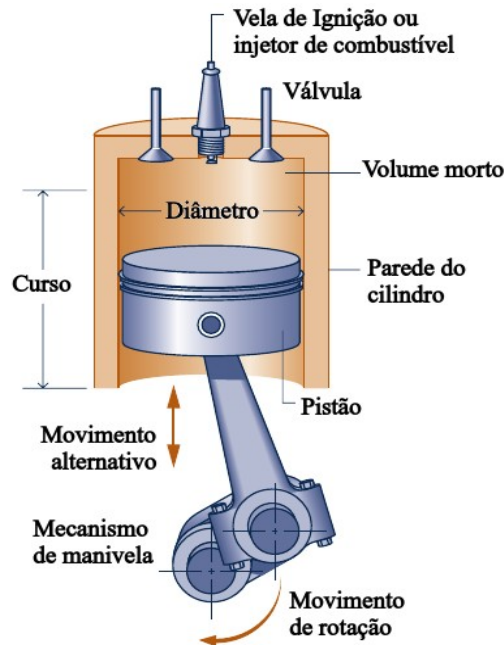
2.1.3 Principais componentes

De acordo com Tillman (2013), os componentes são as partes auxiliares que promovem o funcionamento do motor. Considera-se que:

Os principais componentes de um motor de combustão interna se dividem em dois grupos, os componentes fixos compostos pelos seguintes elementos: bloco do motor, cabeçote e o cárter; e componentes móveis: pistão ou êmbolo, camisas, biela, árvore de manivelas ou virabrequim, válvulas de admissão, válvulas de escape e árvore de comando de válvulas, guias e sede das válvulas, porcas, molas, bucha do balancim, parafuso regulador, mancais, tuchos, casquilhos ou bronzinas, compensadores de massa, volante, juntas, etc. (TILLMAN, 2013, p. 25)

Moran, et al. (2013) demonstra através da figura 3 a nomenclatura básica para um mecanismo cilindro pistão, usado em motores alternativos.

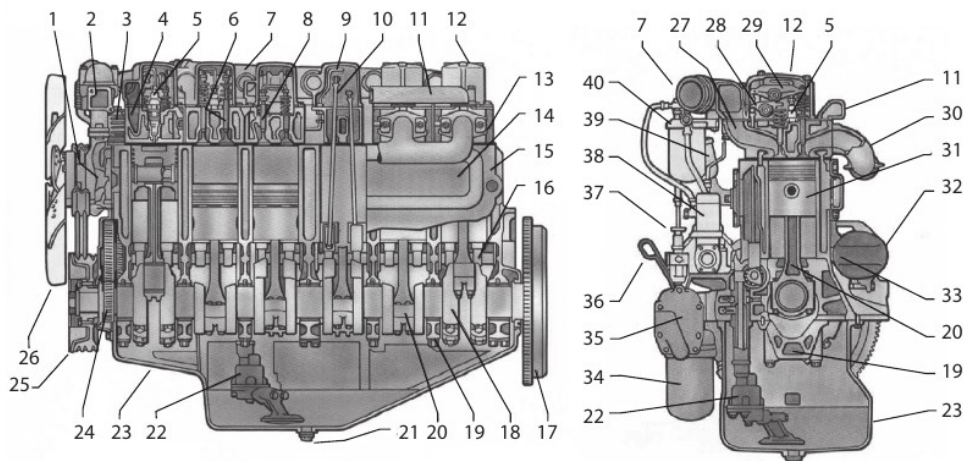
Figura 3: Mecanismo cilindro pistão.



Fonte: Moran, et al. (2013).

Brunetti (2012) apresenta a nomenclatura relativamente atualizada de 40 componentes de um motor de combustão interna comercial genérico. A figura 4 e o quadro 1 apresentam essa nomenclatura.

Figura 4: Nomenclatura de diversos componentes de um motor de combustão interna.



Fonte: Brunetti (2012).

Quadro 1: Nomenclatura de diversos componentes de um motor de combustão interna

1. Bomba-d'água	15. Bloco	29. Balancim da válvula de escapamento
2. Válvula termostática	16. Eixo comando de válvulas	30. Coletor de escapamento
3. Compressor de ar	17. Volante	31. Pistão
4. Duto de admissão	18. Virabrequim	32. Motor de partida
5. Injetor de combustível	19. Capa de mancal	33. Dreno de água
6. Válvula de escapamento	20. Biela	34. Filtro de óleo
7. Coletor de admissão	21. Bujão do cárter	35. Radiador de óleo
8. Válvula de admissão	22. Bomba de óleo	36. Vareta de nível de óleo
9. Linha de combustível	23. Cárter	37. Bomba manual de combustível
10. Haste de válvula	24. Engrenagem do virabrequim	38. Bomba injetora de combustível
11. Duto de água	25. Amortecedor vibracional	39. Respiro do cárter
12. Tampa de válvula	26. Ventilador	40. Filtro de combustível
13. Cabeçote	27. Duto de admissão	
14. Tampa lateral	28. Balancim da válvula de admissão	

Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)

2.1.4 Parâmetros de desempenho

Os parâmetros de desempenho validam características de desempenho mecânico dos motores e são obtidos de forma indireta através da aquisição de dados por ensaios de desempenho desenvolvidos em bancadas dinamométricas, que são equipamentos e instrumentos para avaliar, mensurar e conferir os dados técnicos fornecidos pelos fabricantes (TILLMAN, 2013).

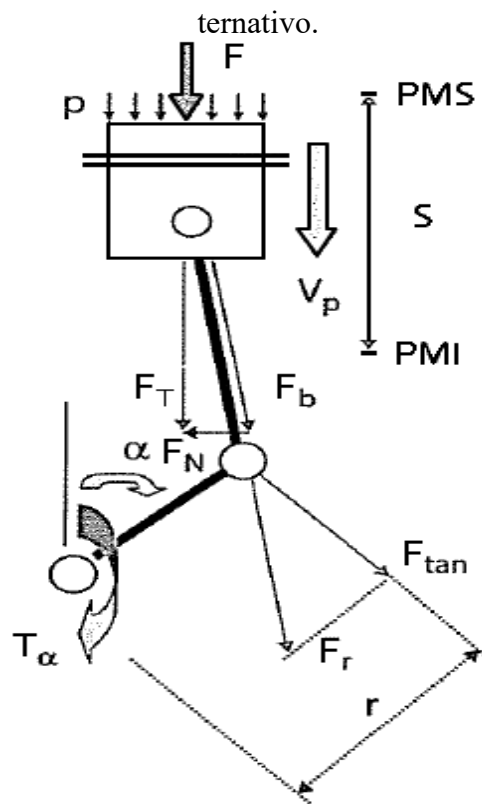
Nesse ensaio os instrumentos e equipamentos fornecem, através de leitura direta, os registros que dizem respeito ao torque ou momento de força, à velocidade angular e ao consu-

mo horário de combustível, além de outros parâmetros. A partir desses dados, podem ser calculados o torque, a potência efetiva e o consumo específico (TILLMAN, 2013).

2.1.4.1 Torque

Brunetti (2012) demonstra a definição de torque através da seguinte figura:

Figura 5: Representação das forças atuantes nas partes móveis de um motor alternativo.



Fonte: Brunetti (2012).

Souza (2017) explica que surge um momento torsor no eixo, composto pela força F_r e pela força normal F_n . A força F resultante no pistão se transmite para biela através das forças F_r e normal F_n e segue para manivela, dando origem a uma força tangencial F_{tan} e consequentemente a um momento instantâneo no eixo do motor (BRUNETTI, 2012).

O Torque (τ) é obtido na prática com o motor em funcionamento a partir do momento torsor médio positivo no eixo de manivelas (SOUZA, 2017). Simplificadamente, o torque

mostra quanto trabalho é produzido (MARTINS, 2006). O torque é um bom indicador das habilidades do motor para realizar trabalho (PULKRABEK, 2004). Uma explicação a respeito da obtenção do torque na prática está presente na sessão 2.2, testes de motores.

Desprezando-se outros efeitos, a força F aplicada no pistão é função da pressão gerada pela combustão, essa pressão é função da rotação e da massa de mistura ar combustível disponibilizada para a combustão (carga). Isso faz com que o torque varie com a rotação e a carga. (BRUNETTI, 2012)

Para aferir o torque ao freio numa dada rotação é necessário impor ao eixo de manivelas a um momento externo contrário de mesmo valor que o produzido pelo motor (SOUZA, 2017). Caso contrário, a rotação variará, aumentando ou diminuindo a medida em que o momento tursor contrário aplicado se tornar menor ou maior que o produzido pelo motor (BRUNETTI, 2013).

2.1.4.2 Potência

Souza (2017) explica que a potência (P) de um motor pode ser definida como a energia útil gerada por unidade de tempo. Enquanto o torque mostra o trabalho produzido, a potência relata a taxa com que esse trabalho é produzido pelo motor (MARTINS, 2006).

Brunetti (2012) afirma que é possível calcular a potência ao freio disponível no eixo do motor, também denominada potência efetiva ou útil, através da obtenção do torque ao freio. Conforme Souza (2017), medindo-se o valor do torque ao freio e a velocidade de rotação é possível obter a potência ao freio do mesmo através da expressão:

$$P_F = \omega \cdot \tau_F \quad \text{Eq. (1)}$$

ou

$$P_F = 2 \pi \cdot n \cdot \tau_F \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

P_F é a potência ao freio produzida, dada em [W];

ω é a rotação dada em [rad/s];

τ_F é o torque ao freio produzido, dado em [Nm];

n é a rotação dada em [rpm].

Essa medição é melhor entendida a partir da obtenção de torque, que será explicado na sessão 2.2, testes de motores.

2.1.4.3 Consumo específico de combustível

Parâmetros importantes que fornecem a maneira como o combustível é transformado em trabalho são o rendimento total (η_T , não abordado neste trabalho) e o consumo específico (C_e), este último em massa de combustível por taxa de trabalho efetuado pelo motor (MARTINS, 2006).

Para obtenção do consumo específico ao freio, mede-se com exatidão o consumo do combustível temporal e conhecendo-se a potência útil temporal desenvolvida, deduz-se o consumo específico ao freio em gramas de combustível por kWh de potência produzida (TILLMAN, 2013). A seguinte expressão representa isso:

$$C_{e_F} = \frac{\dot{m}_{comb}}{P_F} \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

C_{e_f} é o consumo específico ao freio, dado em [g/kWh];

\dot{m}_{comb} é o consumo temporal de combustível, dado em [g/h]; e

P_F é a potência ao freio produzida, dada em [kW].

Por sua vez, a vazão em massa de combustível pode ser calculada por:

$$\dot{m}_{comb} = \rho_{comb} \frac{V_{comb}}{\Delta t} \quad \text{Eq. (4)}$$

Sendo:

ρ_{comb} é a massa específica do combustível, valor conhecido na literatura;

V_{comb} é o volume do combustível [m³];

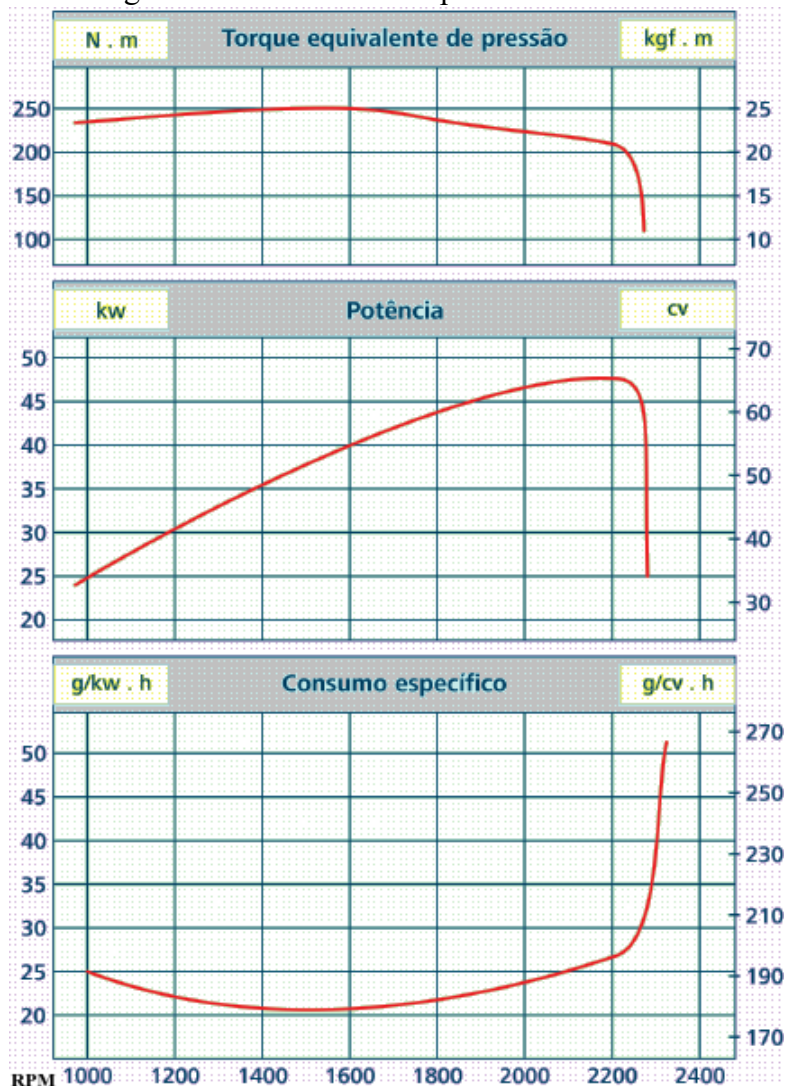
Δt é tempo de escoamento durante a medição [s].

É importante ressaltar que o consumo específico varia de acordo com rotação e com a carga do motor. Para se verificar tais variações é necessário realizar a medição fixando uma das variáveis e variando a outra, obtendo-se uma curva para cada variação da outra. Geralmente se adota a carga do motor fixa e se varia a rotação do mesmo.

2.1.4.4 Curvas características de desempenho

Tillman (2013) apresenta as principais curvas de desempenho (parâmetros descritos anteriormente) de um motor de combustão interna alternativo. A Figura 6 traz um exemplo dessas curvas.

Figura 6: Curvas de desempenho de um motor.



Fonte: adaptado de Tillman (2013) apud Jinma Tractor (2010).

As curvas de desempenho mudam de um motor para outro, mas sempre apresentam aparência semelhante. Tillman (2013) apresenta a seguinte descrição a respeito dessas curvas:

Nos regimes baixos, a potência desenvolvida é relativamente fraca; o torque é importante, mas a velocidade de rotação é fraca. Nos regimes médios, o torque diminui ligeiramente, mas a rotação aumenta fortemente; a potência é nitidamente mais elevada. Nos regimes de potência máxima, a curva torna-se horizontal. O torque diminui fortemente, e essa diminuição é completamente compensada pelo aumento do regime. A potência estabiliza-se. A um regime mais elevado, a diminuição do torque é tão importante que o aumento da rotação não a compensa mais. A potência diminui. O regime de potência máxima é considerado regime normal do motor. Praticamente, é interessante permanecer ligeiramente abaixo. (TILLMAN, 2013, p. 153)

Comenta-se ainda, sobre as curvas acima, que, geralmente, o torque máximo ocorre em 50% da rotação máxima e a potência máxima ocorre entre 66% e 75% da rotação máxima suportada pelo motor. Estas são observações comportamentais verificadas ao longo dos anos nos diversos motores já construídos.

Martins (2006) explica que o valor do torque é aproximadamente proporcional à quantidade de ar que entra no motor e que como a potência é dada pelo produto do torque pela velocidade de rotação, a sua forma dependerá da curva de torque. O andamento da curva de consumo específico não tem nenhuma relação direta com as outras curvas, verificando-se que o consumo mínimo corresponde, geralmente, a uma velocidade intermédia entre os máximos das curvas de torque e de potência.

2.2 TESTES DE MOTORES

Segundo Rohenkohl (2004), citado por Haical (2009), alguns dos principais testes de bancada realizados em motores de combustão interna são:

- Teste de Emissões
- Teste de Consumo de Combustíveis
- Teste de Amaciamento de Motores
- Teste de Desempenho de Lubrificantes

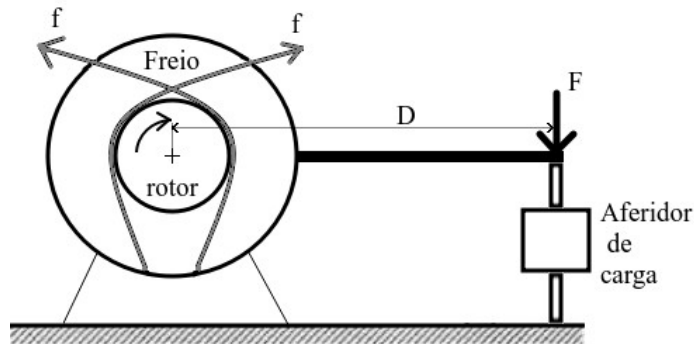
Os testes de emissões de poluentes servem para obter dados sobre os gases do escapamento do motor e são importantes sob o ponto de vista mais amplo de eficiência dos motores de combustão, que considera também, além do trabalho produzido e do consumo de combustível, os impactos causados ao meio ambiente onde estes recursos são empregados (HAICAL, 2009).

Destaca-se também que existem bancadas para pesquisa do processo de combustão, para avaliação do escoamento do ar nos coletores de admissão e nos dutos de escapamento e para análise visual do processo de combustão; bancadas para desenvolvimento, em que desempenho, funcionalidade e durabilidade são avaliados, calibrações podem ser realizadas e, também, certificações para emissões podem ser efetuadas; bancadas para teste de produção, dentre as quais se encontram as bancadas de amaciamento e de avaliação de certificação de qualidade e testes em ambiente controlado, para aplicações com valores de temperatura, umidade e pressões extremas (BERTOTI, 2018).

Embora não relatado por Haical (2009) e Bertoti (2018), o teste abordado aqui será simplesmente relacionado a avaliação de parâmetros de desempenho, em que, como todos os testes citados acima, se utiliza uma bancada dinamométrica. Os testes citados acima são uma derivação do teste avaliação de parâmetros de desempenho, visto que para realizá-los se acrescenta a bancada dinamométrica instrumentos específicos para tais fins.

Souza (2017) explica que para aferir torque e potência de um motor o eixo do mesmo é ligado a um freio dinamométrico que o trava a uma dada rotação ou com um dado torque (através de uma força contrária ou de atrito f). O dinamômetro consiste num rotor ligado ao eixo do motor e num freio apoiado em rolamentos e ligado a um aferidor de carga localizado no extremo de um braço de comprimento D , resultando numa força F , medida por esta. O resultado do torque é obtido a multiplicação de D por F , que multiplicado pela velocidade de rotação do motor fornece a sua potência (MARTINS, 2006). Esse esquema de teste é mostrado de forma genérica (existem diversas variações de projeto) na figura a seguir.

Figura 7: Freio dinamométrico.



Fonte: adaptado de Martins (2006).

Dessa forma, tem-se a partir da figura 7 acima que:

$$\tau = D \times F \quad \text{Eq. (5)}$$

Souza (2017) cita diferentes sistemas podem ser utilizados para impor as cargas resistivas ao torque do motor, caracterizando assim diferentes tipos de dinamômetro. São eles:

- i. Dinamômetro de inércia;

Consiste de massas inerciais, geralmente cilindros de inércia conhecida, que são submetidas à força motriz do motor (SOUZA, 2017).

- ii. Dinamômetro hidráulico;

Neste tipo, o eixo do motor faz com que um rotor cilíndrico mova um líquido para compartimentos (este rotor faz o papel do freio), tentando movê-lo por transferência de quantidade de movimento de água (SOUZA, 2017). Este tipo de dinamômetro não funciona bem em baixas rotações, mas suporta elevadas velocidades, sendo indicado, por exemplo, para testar turbinas (MARTINS, 2006).

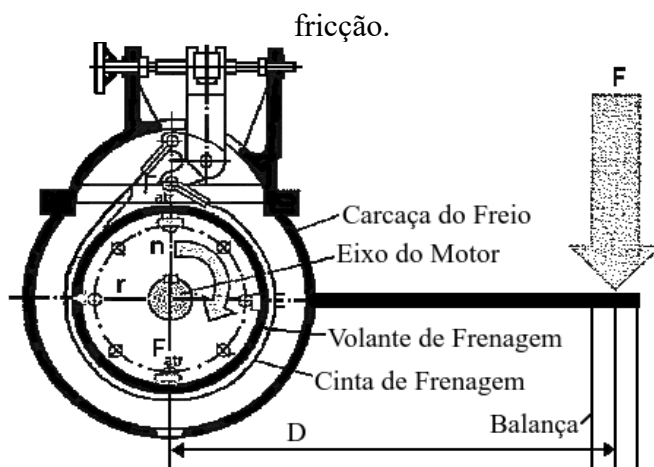
- iii. Dinamômetro elétrico;

A energia absorvida é transformada em energia elétrica, que pode ser retirada do freio como eletricidade ou como calor resultante das perdas electromagnéticas (MARTINS, 2006).

- iv. Dinamômetro de fricção.

É constituído por um volante onde atua um sistema de freio conectado a um braço cuja extremidade se apoia sobre a plataforma de uma balança. É basicamente a mesma construção do Freio do Prony. O volante, acionado pelo motor, tem o seu movimento restringido pela pressão aplicada no sistema de freio que transmite o esforço ao braço apoiado sobre a balança (SOUZA, 2017). A figura a seguir demonstra um Freio de Prony, que é um projeto clássico de dinamômetro de fricção.

Figura 8: Freio de Prony: Freio dinamométrico de fricção.



Fonte: Adaptado de Brunetti (2012).

Por conta de suas características de simplicidade e baixo custo, a bancada dinamo-métrica da EST/UEA é equipada com um dinamômetro de fricção. O mecanismo de frenagem é construído com um sistema de frenagem a disco com acionamento mecânico (cabos), conforme apresenta a figura 1. O capítulo 3 apresenta maiores detalhes sobre a bancada.

2.3 ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA

Este capítulo visa mostrar a importância e formas de se obter balanços de energia e de exergia, ambos aplicados a motores de combustão interna.

Júnior e Rodrigues (2015) afirmam que calor e trabalho são formas de energia e que as leis da Termodinâmica (especificamente a 1ª e a 2ª) mudaram a forma com que cientistas e engenheiros pensavam sobre estas duas formas de energia.

A 1ª lei da termodinâmica explica o princípio da conservação da energia e a 2ª lei da termodinâmica, tendo maior aplicabilidade na construção de máquinas e utilização na indústria, vem permitindo o aumento da eficiência de projetos, visando maior competitividade e redução de custos de produção (JÚNIOR E RODRIGUES, 2015).

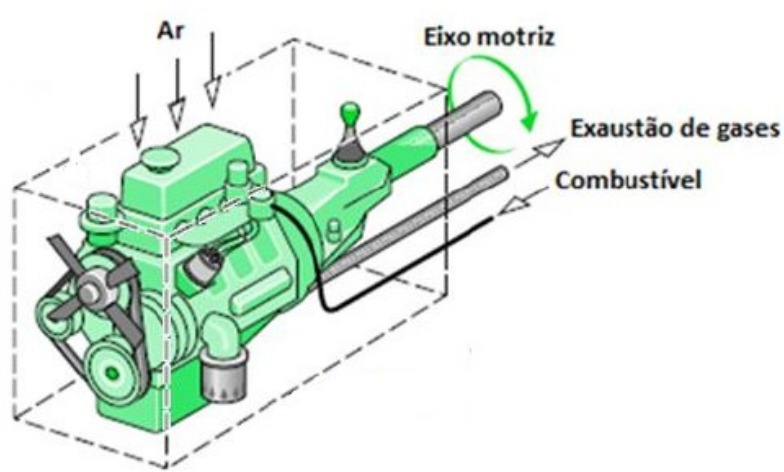
Júnior e Rodrigues (2015) ressaltam que a energia em um sistema sempre se conserva, mesmo que mudando de formas, especialmente onde a sua parcela útil (a capacidade de realizar trabalho) é menor e menos utilizável. Isto significa que nenhuma energia será criada nem destruída (COSTA, 2007).

A conservação da energia implica a busca imediata de um uso eficiente dos recursos energéticos, dada a evidência quando se considera o custo e a disponibilidade do combustível (COSTA, 2007). Por isso, além da redução do impacto ambiental, pois consumindo menos combustível em processos com maior eficiência, se reduz a emissão de gases poluentes, não é de se espantar que a cada ano está sendo mais priorizada a eficiência em processos (JÚNIOR E RODRIGUES, 2015).

Costa, 2007, ressalta que existe no estudo de motores de combustão interna a necessidade de se entender qual a percentagem que cada processo da conversão de energia, destrói de potencial de produção de trabalho. Isso é possível se realizando a identificação dos locais de maior perda, através de análises energéticas e exergéticas, tornando possível, através destes estudos, os aproveitamentos de parcelas que poderiam ser ignoradas inicialmente e a descon sideração de pontos que a priori eram tomados como importantes de se observar.

A figura a seguir representa um motor a combustão interna como *volume de controle* (que significa o mesmo que sistema aberto) que será discutido mais a frente.

Figura 9: Representação de um motor como volume de controle.



Fonte: Adaptado de Moram, et al (2013).

2.3.1 Balanço de massa

Moran, et al (2013) formulam a expressão que representa o balanço de massa para um sistema aberto com várias entradas e várias saídas, apresentado a seguir.

$$\sum_{entrada} \dot{m}_{entrada} - \sum_{saida} \dot{m}_{saida} = \frac{dm_{vol. cont}}{dt} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

$\sum_{entrada} \dot{m}_{entrada}$ é o somatório das taxas temporais de fluxo de entrada de massa no volume de controle;

$\sum_{saida} \dot{m}_{saida}$ é o somatório das taxas temporais de fluxo de saída de massa no volume de controle;

$\frac{dm_{sist. aberto}}{dt}$ é a taxa temporal de variação de massa no interior do volume de controle.

Para caso não haja variações de massa no volume de controle, o valor da última parcela da equação (6) será zero, implicando escrever que:

$$\sum_{entrada} \dot{m}_{entrada} = \sum_{saida} \dot{m}_{saida} \quad \text{Eq.(7)}$$

O balanço de massa é usado no motor de combustão interna nos fluxos de ar, de combustível e de gases de escape. A figura 9 apresenta esse fluxo, o qual é necessário para se obter também balanços de energia e balanços de exergia.

2.3.2 Balanço de energia

Moran, et al (2013) desenvolvem a ideia de que o balanço de energia para um sistema aberto é descrito com a seguinte expressão.

$$\dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \dot{m}_{ent} \left(h_{ent} + \frac{v_{ent}^2}{2} + gZ_{ent} \right) - \dot{m}_{sai} \left(h_{sai} + \frac{v_{sai}^2}{2} + gZ_{sai} \right) = \frac{dE_{VC}}{dt} \quad \text{Eq.(8)}$$

Onde:

\dot{Q}_{VC} é a parcela de calor que entra (ou sai) no volume de controle;

\dot{W}_{VC} é a parcela de trabalho que sai (ou entra) do volume de controle;

$\dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gZ \right)$ é a taxa de energia resultado da transferência de massa, sufixos “ent”

para entrada de massa e “sai” para saída de massa;

$\frac{dE_{VC}}{dt}$ é a taxa de variação da energia dentro do volume de controle.

Costa (2007) explica que a taxa de transferência de calor adicionado a taxa de energia que entra no mesmo como resultado da transferência de massa é igual a taxa de variação da energia dentro do sistema mais a taxa de energia que sai deste, como resultado da transferência de massa, e mais a potência associada a eixo, cisalhamento, efeitos elétricos e outros fatores.

Para se aplicar esse balanço ao motor da figura 9, necessitaria levantar dados sobre todo o calor produzido e trocado com o ambiente, as massas de ar, combustível e gases e o trabalho gerado e juntamente da equação (8) se teria uma ideia da variação de energia no volume de controle e dos caminhos que a energia toma ao ser transformada, os quantitativos aproveitados e desperdiçados.

2.3.3 Balanço de exergia

Moran, et al (2013) define que: Exergia é o máximo trabalho teórico possível a ser realizado a partir de um sistema global, composto por um sistema e o ambiente, conforme o sistema entra em equilíbrio com o ambiente.

Costa (2007) diz que a exergia tem sido utilizada como um indicador de referência ecológica na comunidade científica, que tem procurado acompanhar mais de perto os dispositivos de conversão de energia e desenvolver novas técnicas para melhor utilizar as fontes limitadas existentes.

Para análise de exergia, Moran, et al (2013) define que ambiente é um sistema compressível simples, de grande extensão e uniforme. Diz-se que um sistema de interesse está no estado morto quando este está em repouso (equilíbrio termodinâmico) com relação ao ambiente.

Moran, et al (2013) define a expressão para exergia em um estado especificado.

$$B=(U-U_0)+p_0(V-V_0)+E_p+E_c-T_0(S-S_0) \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

B é a exergia em um estado especificado;

$U-U_0$ é a diferença de energia interna entre o estado especificado e o ambiente (estado morto);

p_0 é a pressão ambiente (estado morto);

$V-V_0$ a diferença de volume do sistema entre o estado especificado e o ambiente (estado morto);

$E_p; E_c$ são, respectivamente, a energia potencial e a energia cinética do sistema no estado especificado;

T_0 é a temperatura ambiente (estado morto);

$S-S_0$ é a diferença de entropia do sistema entre o estado especificado e o ambiente (estado morto).

A exergia de um sistema num estado especificado depende das condições do ambiente tanto quanto das propriedades do sistema. Um sistema realizará o máximo trabalho possível quando ele sofrer um processo reversível de um estado inicial especificado até o estado morto. (COSTA, 2007)

Moran, et al (2013) representa o máximo trabalho teórico possível de ser realizado por um sistema por:

$$W_{SI} = (U - U_0) + p_0(V - V_0) + E_p + E_c - T_0(S - S_0) - T_0\sigma_{SI} \quad \text{Eq.(10)}$$

Onde:

W_{SI} é o máximo trabalho teórico possível de ser realizado pelo sistema especificado;

σ_{SI} é a diferença de entropia ambiente (estado morto) e a entropia do sistema, adicionada das variações de entropia do sistema para o ambiente. Este leva em conta a produção de entropia devido as irreversibilidades a medida que o sistema entra em equilíbrio termodinâmico com o ambiente (MORAN, et al, 2013).

O valor do termo $T_0\sigma_c$ depende da natureza do processo, do estado inicial, do estado final, e do caminho do processo, à medida que o sistema evolui para o estado morto. De acordo com a 2ª lei da termodinâmica, $T_0\sigma_c$ é positivo quando há presença de irreversibilidades e se anula quando essas não ocorrem, mas nunca é negativo. Por isso, o valor teórico máximo para o W é dado com $T_0\sigma_c$ igual a zero, que é a definição de exergia (JÚNIOR E RODRIGUES, 2015).

Haverá sempre uma diferença, grande ou pequena, entre a exergia e o trabalho real produzido por um dispositivo. Esta diferença representa o espaço que os cientistas e engenheiros têm para realizar melhorias (COSTA, 2007).

2.4 ARDUÍNO

O Arduíno é uma plataforma microcontrolada, construída em uma placa flexível e de fácil manipulação, com uma ampla disponibilidade de modelos para atender a inúmeras atividades. Possui um Ambiente Integrado de Desenvolvimento (IDE) baseado em linguagem C/

C++ que pode interagir com o ambiente a partir de um código específico por intermédio de sensores e atuadores, de modo autônomo ou comunicando-se com um computador para realizar alguma tarefa específica (MARTINAZZO, ORLANDO 2016).

De forma mais simples e direta, McRoberts (2011) afirma que o Arduíno é um pequeno computador em que é possível programar para processar entradas e saídas entre o dispositivo e os componentes externos conectados a ele.

Existem atualmente várias versões de placas microcontroladas aquisitoras de dados com preços populares, mas, sem dúvida, a placa mais conhecida é a Arduíno (MARTINAZZO, et al. 2014).

O hardware e o software do Arduíno são ambos de fonte aberta, o que significa que o código, os esquemas, o projeto, etc. podem ser utilizados livremente por qualquer pessoa e com qualquer propósito. Dessa forma, há muitas placas clone e outras placas com base no Arduíno disponíveis para compra, ou que podem ser criadas a partir de um diagrama (MCROBERTS, 2011).

Para programar o Arduíno (fazer com que ele faça o que se deseja) é necessário utilizar o Ambiente Integrado de Desenvolvimento (IDE) do Arduíno, um software livre no qual se escreve o código na linguagem que o Arduíno compreende (baseada na linguagem C/C++). O IDE permite se seja escrito um programa de computador, que é um conjunto de instruções passo a passo, das quais se faz o upload para o Arduíno, que então executará essas instruções, interagindo com o que estiver conectado a ele (MCROBERTS, 2011).

A proposta de se fazer o projeto apresentado neste trabalho com Arduíno é justificada considerando a facilidade de uso, a grande disponibilidade de componentes externos e o baixo custo. Ressalta-se que há vários modelos e tipos de Arduíno, sendo cada um a solução ideal de determinado projeto. A figura abaixo mostra uma foto do Arduíno Uno R3.

Figura 10: Arduino Uno R3.



Este Arduino da figura 10 apresenta 13 pinos digitais e 6 pinos analógicas, que podem ser configuradas de acordo com a necessidade de utilização através da IDE. Além disso, apresenta a saída de 3,3V e 5V para uso dos sensores ou periféricos.

2.5 SENSORES DE TEMPERATURA E VAZÃO

Destacam-se nesse capítulo alguns meios de se obter temperatura e vazão. Dá-se atenção especial aos tipos de sensores que podem ser utilizados neste projeto, juntamente ao Arduino.

2.5.1 Sensores de temperatura

Há diversos tipos de sensores de temperatura no mercado, com diferentes mecanismos de funcionamento. Silveira (2018), Mattede e GlobalSpec relatam os principais tipos e, de forma básica, o funcionamento de cada um:

- Termopares: sensíveis e precisos, consistem na união em uma extremidade de um par de fios de metais distintos e de diferentes propriedades. Tal par de fios gera uma diferença de tensão termoelétrica quando se aplica uma corrente, que reflete sua temperatura;

- RTD (do inglês: “Resistance Temperature Detectors”): consiste num enrolamento de fios que apresenta mudança em sua resistência elétrica de acordo com a variação de temperatura;
- Termistores: consiste em um dispositivo semicondutor que possui resistência elétrica proporcional a sua temperatura. Há dois tipos, tais quais com coeficientes de temperatura opostos, um negativo (NTC) e outro positivo (PTC);
- Interruptores bimetálicos: são sensores mecânicos que utilizam molas bimetálicas como elemento do sensor de temperatura;
- Sensor de temperatura infravermelho: não requer contato para aferição de temperatura, consiste em um sensor infravermelho que absorve radiação infravermelha emitida por superfícies aquecidas.

Especificamente, para placas eletrônicas digitais, como o Arduíno, estão disponíveis também sensores digitais, como o modelo DS18B20 produzido pela Dallas Instruments (MAXIMINTEGRATED). Para a utilização de alguns tipos de sensores, como dos tipos termopar e termistor, há a necessidade de utilização de circuitos externos e/ou cálculos para conversão entre a temperatura e a resistência e/ou tensão, que não variam de forma linear entre si (MARTINAZZO, ORLANDO 2016).

2.5.2 Sensores fluxos em massa de ar eletrônicos

De acordo com Kohut (2016), se apresentam dois tipos de sensores eletrônicos para aferição de fluxos de ar, sendo:

- Sensor VAF (do inglês “Vane AirFlow”): consiste em uma borboleta (“flap”) fixado na passagem de ar a qual acopla um potenciômetro no seu eixo. Conforme o ar passa, vencendo a resistência programada no mecanismo, abre a borboleta e aciona o potenciômetro, apresentando uma variação de tensão que é equivalente a passagem de ar;
- Sensor MAF (do inglês “Hot-film Mass AirFlow” ou “Hot-wire Mass AirFlow”): consiste em um fio ou filme termistor aquecido a uma temperatura mais alta que o ambiente de forma constante. Conforme o ar passa, tende a resfriar o fio ou filme fazendo a resistência do material mudar, apresentando no circuito uma variação de tensão (sensor MAF do tipo analógico) ou frequência (sensor MAF do tipo digital).

2.5.3 Sensores de fluxo para líquidos

Há uma variedade muito grande de métodos de aferição de fluxo para líquidos. Schneider (2000) apresenta de forma detalhada uma grande variedade de métodos. Apresentam-se aqui alguns tipos:

- Sensores rotativos: baseiam-se na transformação relativa da velocidade de um rotor, submetido ao escoamento de um fluido, em variáveis de meios eletrônicos, como diferenças de tensão ou variação de frequência. Entram nesta categoria: anemômetros, turbinas, palhetas, etc;
- Tanques aferidos: consiste em medir a diferença de nível de fluido em um reservatório de dimensões conhecidas ao longo de um período de tempo também conhecido, permitindo o cálculo da vazão;
- Medidores por obstrução: tratam-se de sensores ou dispositivos que permitem a medição de fluxo através da variação de pressão provocada por uma obstrução;
- Rotâmetros: trata-se de um medidor de vazão mecânico baseado na variação de arrasto dentro de um tubo cônico;
- Medidores deslocamento positivo: tratam-se de medidores que se utilizam de deslocamento positivo para aferição do fluxo. Entram nesta categoria medidores dos tipos: pistão, registro rotativo, lóbulos, engrenagens, etc.

3 METODOLOGIA

Nesse capítulo a bancada de teste destacada na figura 1 e o projeto nela desenvolvido estão descritos. Toda a idealização do projeto, juntamente também ao que já fora realizado, é apresentado.

3.1 DESCRIÇÃO BANCADA DE TESTE ANTES DA REALIZAÇÃO DO PROJETO

A bancada de testes antes da realização deste projeto, conforme figura 1, é composta por um motor Branco B4T – 5.5 HP e um sistema que possibilita a aferição de torque ao freio e potência ao freio. Uma foto e descrições mais detalhadas do motor se encontram a seguir.

Figura 11: Motor Branco B4T – 5.5 HP.



Quadro 2: Descrição do motor Branco B4T – 5.5 HP.

Tipo	Motor horizontal, monocilíndrico, 4 tempos, refrigerado a ar. Comando de válvulas OHV.
Partida	Partida manual
Combustível	Gasolina
Cilindrada	163 cm ³
Diâmetro x curso	68mm x 45mm
Razão de compressão	8,5:1
Potência máxima	5,5CV a 3600rpm
Potência contínua	5,0CV a 3600rpm
Torque máximo	1,1kgfm a 2500rpm
Ignição	Eletrônica
Controle de rotação	RAR
Lubrificação	Óleo, salpico
Consumo	1,5 l/h
Capacidade do tanque	3,6 litros
Capacidade de óleo (cárter)	600 ml

Fonte de dados: Fabricante: BRANCO: B4T – 5.5 HP.

O sistema que possibilita a aferição de torque ao freio e potência ao freio é composto por: uma alavanca de acionamento, um sistema mecânico de frenagem a disco, uma balança de pesagem e um tacômetro de ignição. A alavanca de acionamento é ligada a balança e desta ao sistema de freio através de cabos de aço. O tacômetro é conectado diretamente na vela de ignição do motor. Apresenta-se a seguir a foto desses componentes.

Figura 12: Da esquerda para a direita: Alavanca, sistema de frenagem, balança e tacômetro.



A fim de facilitar a compreensão do leitor, a figura a seguir apresenta um esboço básico do sistema dinamométrico mecânico.

Figura 13: Esboço do sistema dinamométrico mecânico.



3.2 PROCEDIMENTOS ELABORAÇÃO E PROPOSTA INICIAL DE MONTAGEM

Mostram-se a seguir os parâmetros que se desejam conhecer durante um teste no motor de bancada, visando que seja possível a verificação de consumo específico de combustível

e a realização de balanços energéticos e exergéticos. São estes os parâmetros, com alguns detalhes relevantes:

- Temperatura de saída dos gases de escapamento: se tratam de temperaturas elevadas;
- Temperatura média do corpo do motor: requer mais de um ponto de medição para a obtenção de médias;
- Fluxo de ar que entra no motor: requer uma certa precisão, geometria do motor é desfavorável;
- Fluxo de gases que saem do motor: requer uma certa precisão, geometria do motor é desfavorável;
- Fluxo de combustível que entra no motor: requer elevada precisão, pois é um fluxo pequeno.

Deseja-se que toda essa coleta de dados seja feita através do Arduíno, sensores e de uma tela LCD.

O quadro a seguir apresenta o esboço inicial descritivo dos recursos principais necessários a realização do projeto, de acordo com os parâmetros citados acima. Todos os recursos reais utilizados serão apresentados mais a frente

Quadro 3: Levantamento inicial de recursos materiais necessários para realização do projeto.

Item	QTD.	Detalhes/Uso
Sensor de alta temperatura	1	Sensor de aferição para temperaturas elevadas para medir a temperatura dos gases de escape recém-saídos de um motor*.
Sensor de fluxo de combustível	1	Sensor de aferição de fluxos líquidos, capaz de resistir a ataque químico de combustível e precisão para fluxos médios de 1,5 l/h. Objetiva-se medir a vazão de combustível consumida por um motor*.
Sensor de fluxo de Ar	2	Sensor de aferição de fluxo de ar para medir o fluxo de ar de entrada e o fluxo de gases de saída de um motor*.
Sensor de baixa temperatura	2	Sensor de aferição de temperaturas não elevadas, para medir a temperatura média da carcaça de um motor*.
Microcomputador Controlador: Arduíno	1	Micro computador programável para utilização com sensores periféricos. Utilizar-se-á neste projeto o Arduíno. Objetiva-se reunir, calcular e disponibilizar informações vindas dos sensores.
Tela LCD	1	Tamanho ideal para captação de 6 informações, com seus res-

		pectivos detalhes. Disponibilizará as informações reunidas e calculadas pelo microcomputador.
Fonte alimentadora	2	Fonte de tensão 12V, Necessário para alimentar o microcomputador, os sensores e a tela.

* “motor” se refere a um motor de combustão interna, monocilíndrico, naturalmente aspirado, resfriado a ar e com admissão de combustível realizada por carburador.

Para fins de explicação, o termo “temperaturas elevadas” se referem a temperaturas acima de 150°C o termo “baixas temperaturas” ou “temperaturas não elevadas” se referem a temperaturas abaixo de 125°C.

Tal levantamento inicial relatado acima mudou devido a dois problemas ocorridos durante o levantamento de recursos. São estes os problemas:

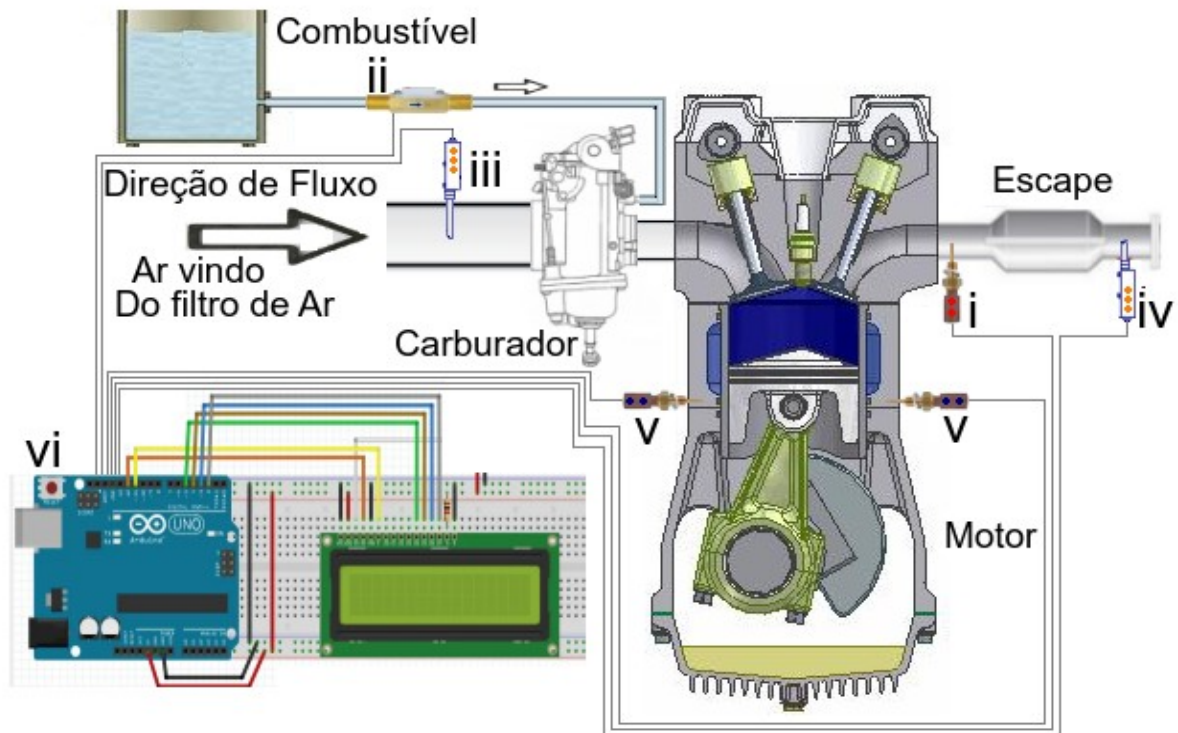
- Não se encontrou para aquisição sensores de fluxo de ar do tipo mecânico, não se sabe o motivo da falta deste no mercado mas é conhecido que ele é relativamente de baixo custo e fácil de manusear;
- Para se medir um fluxo líquido abaixo de 1,5 l/h (litros por hora) é necessária uma precisão elevada, tal precisão faz com que o custo deste sensor seja alto o suficiente para desconsiderá-lo do projeto.

Adotou-se, para contornar estes dois problemas, as seguintes soluções:

- Uso unicamente de sensor de fluxo de ar do tipo MAF;
- Utilização de um sistema alternativo mecânico para contabilização do fluxo de combustível.

Idealizou-se inicialmente o projeto conforme a figura esboço 2D apresentada a seguir.

Figura 14: Representação inicial de elaboração do projeto.

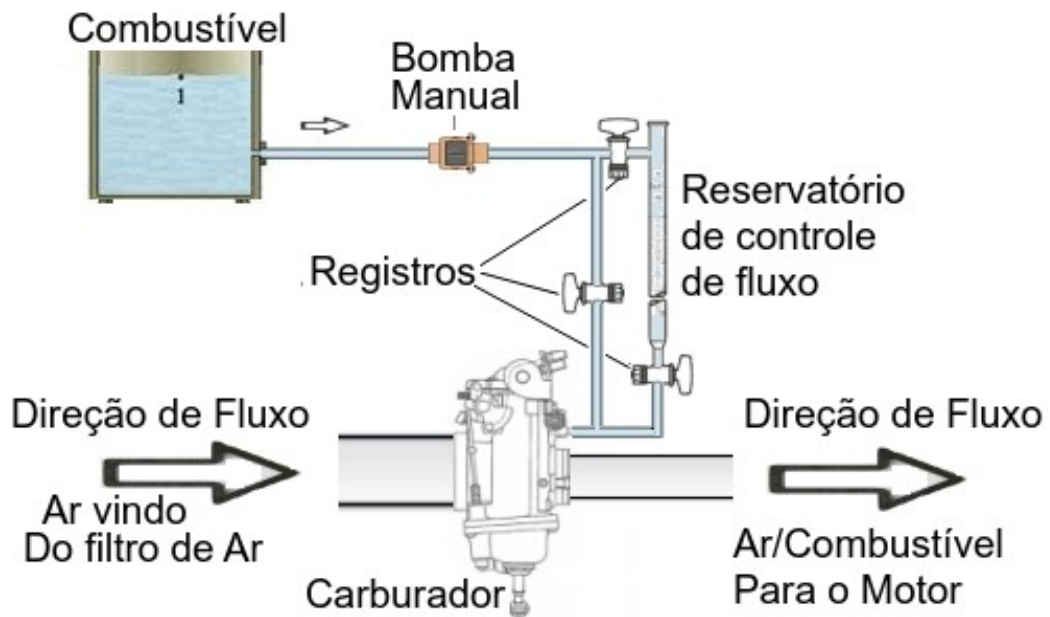


Explica-se a montagem de cada item destacado em número romano da figura 14 acima a seguir:

- i. O sensor de alta temperatura é fixado no início do coletor de escape, a fim de medir a temperatura de saída dos gases de escape. Faz-se um furo e, em seguida, uma rosca e se fixa o sensor. Em caso de vazamento, se utiliza resina ou silicone resistente a altas temperaturas para vedação.
- ii. O sensor de fluxo de combustível ficaria na tubulação entre o tanque e o carburador. Devido ao seu alto custo, para estas condições de uso, se desconsiderou do projeto. Elaborou-se e escolheu-se dentre duas alternativas viáveis a fim de se contornar este problema, mas esses sistemas fogem do escopo deste projeto, pois o objetivo do mesmo é trabalhar apenas com sensores eletrônicos. São estas as alternativas:
 - o A primeira alternativa, recomendada e escolhida como proposta padrão, é a colocação de um reservatório de controle de fluxo graduado entre o tanque e o carburador, com entrada e saída controladas por registros, tendo-se também uma bomba manual, para suprir a demanda do reservatório extra, e uma linha de combustível que torna possível o desligamento desse sistema. Assim, em um teste, é possível estimar com certa preci-

são quanto combustível é consumido pelo motor. A figura a seguir apresenta este aparato proposto.

Figura 15: Representação do aparato proposto para contornar a falta de um sensor de fluxo líquido.



Observa-se que no lugar do sensor de fluxo de combustível há um reservatório de controle de fluxo, com dois registros, e uma linha de alternativa, com um registro.

- A segunda alternativa se dá através de um tanque móvel ou um tanque de medição, o qual terá uma balança para se medir a variação de peso do tanque durante o teste, possibilitando estimar a quantidade de combustível consumida pelo motor.
- iii. O sensor de fluxo de ar tipo MAF é fixado no coletor de admissão de ar, onde contabilizará a quantidade de ar admitida pelo motor. A colocação é feita através de um furo e em caso de vazamento é possível utilizar resina ou silicone para vedação. É preciso calibrá-lo através de fatores numéricos para seu correto funcionamento sob estas condições de uso, detalhes explicados mais a frente.
- iv. O sensor de fluxo de gases tipo MAF é fixado no fim do escapamento. Ele contabilizará o fluxo de gases de escapamento do motor, que deverá ser maior que o fluxo de ar da entrada. A calibração deste é feita de acordo com o sensor de fluxo de ar, item iii acima.;

- v. Os sensores de baixa temperatura, sendo dois ou mais, são instalados no corpo do motor, em contato direto com as aletas de resfriamento. É estimado através de aferição e cálculos a área total de troca de calor do corpo do motor e do cabeçote, a fim de se obter uma média de quanto calor é perdido no resfriamento.
- vi. O Arduíno, os fios, a protoboard, os cabos e todos os elementos eletrônicos restantes são responsáveis por coletar e fazer os ajustes necessários de todas as informações dos sensores e disponibilizá-las.

3.3 PROCEDIMENTOS DE MONTAGEM DO SISTEMA DE AFERIÇÕES

Ressalta-se que o sistema de aferição de fluxo de combustível adotada ao longo da realização do projeto, por conta da falta de um sensor de fluxo, é diferente daquela que foi proposta inicialmente. Portanto, devido a esta mudança que faz este sistema em especial fugir do escopo deste trabalho, a elaboração e integração do sistema de aferição de vazão de combustível não mais será abordada neste trabalho, ficando apenas a sugestão de construção da figura 15.

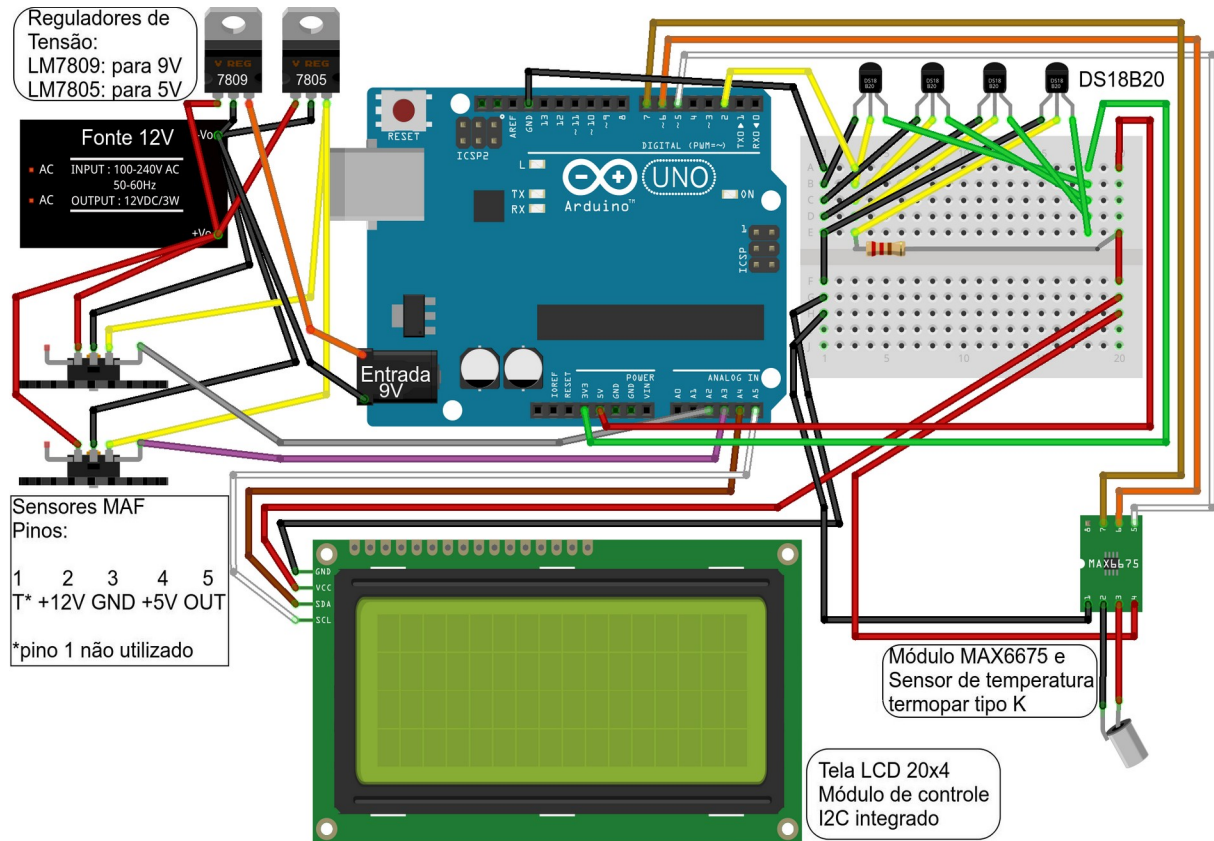
Dividem-se tais procedimentos em duas etapas: o procedimento de montagem dos componentes eletrônicos, o procedimento de integração do sistema eletrônico de aferição ao motor.

3.3.1 Procedimento de elaboração e montagem dos componentes eletrônicos

Após a aquisição dos componentes necessários, procedeu-se com a montagem do sistema eletrônico de medições de temperaturas e vazão de ar e de gases de escapamento. Tem-se como parâmetro a presunção de que o Arduíno faz a coleta de todos os dados e disponibiliza os mesmos em uma tela LCD, sem que seja necessário o uso de outros elementos externos, como um computador por exemplo.

Descrevem-se os dispositivos eletrônicos no capítulo 4, que trata dos recursos. A figura abaixo mostra todo o esquema elétrico desenvolvido no projeto.

Figura 16: Esquema eletrônico desenvolvido no projeto.



O esquema elétrico foi elaborado com o software gratuito Fritzing. A figura 16 acima apresenta:

- Sensor de temperatura tipo K e módulo MAX6674: recebem 5V da protoboard e se comunicam com o Arduino pelas portas digitais 5, 6 e 7. Este módulo acoplado ao sensor já é capaz de aferir temperaturas elevadas. Maximintegrated apresenta todas as características de funcionamento do módulo MAX6674 (vide referências);
- Dois sensores MAF: recebem 12V da fonte e 5V do regulador de tensão LM7805. Se comunicam com o Arduino através das portas analógicas A3 e A4. Bosch apresenta todas as características de funcionamento destes sensores MAF (vide referências).
- Quatro sensores de temperatura digitais DS18B20: recebem 3,3V da protoboard e se comunicam com o Arduino pela porta digital 2. Maximintegrated apresenta todas as características de funcionamento dos sensores DS18B20 (vide referências);
- Arduino Uno R3. Recebe 9V do regulador de tensão LM7809 e é responsável por gerenciar todos os sensores e periféricos;

- Tela LCD 20x4 com módulo de controle I2C integrado: recebem 5V da protoboard e se comunicam com o Arduino pelas portas analógicas A4 e A5;
- Fonte 12V: recebe 127V CA ou 220V CA da rede elétrica doméstica e transforma em 12V CC.
- Circuitos reguladores de tensão LM7809 e LM7805: recebem 12V da fonte e transforma em 9V e 5V, respectivamente.

Ressalta-se que a protoboard recebe 5V e 3,3V do Arduino, conforme figura 15. O código fonte de programação do Arduino é disponibilizado no apêndice A, o mesmo foi elaborado no software gratuito Arduino IDE.

3.3.2 Procedimentos de integração dos componentes eletrônicos ao motor

Descrevem-se os procedimentos realizados para se integrar o sistema eletrônico ao motor a seguir:

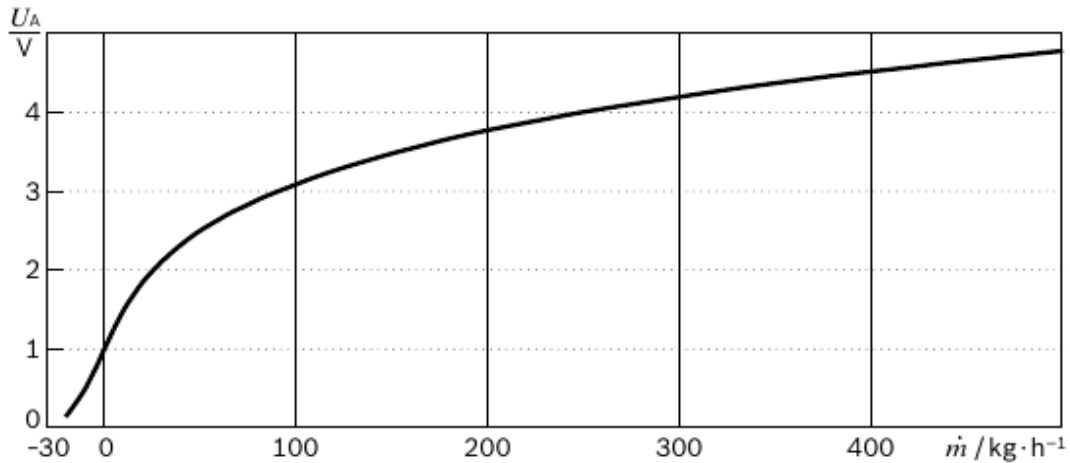
- Removeu-se o escapamento do motor e com furadeira e broca 6mm furou-se o mais próximo possível do motor no coletor de escapamento. Com macho de rosca 6mm fez-se rosca e com auxílio de chave combinada 10mm se instalou o sensor termopar tipo K.
- Aplicou-se pasta térmica nos locais de instalação dos sensores DS18B20 e se fixaram os mesmos com silicone resistente a altas temperaturas.
- Remove-se o filtro de ar e com auxílio de uma serra fez-se um corte na tubulação de entrada de ar e se fixou o sensor MAF de entrada com silicone de cura acética.
- Elaborou-se com auxílio uma tubulação de PVC com interior de 30mm e duas barras metálicas o alojamento do sensor MAF de saída. Fixou-se a tubulação com silicone de cura acética e as barras ao sensor MAF através de parafusos e porcas.

Com todo o sistema instalado, procedeu-se com a estimativa de área de troca de calor do corpo do motor. Mediu-se através de régua e paquímetro as dimensões das aletas de resfriamento e do corpo do motor e estimou-se a área total de troca de calor como sendo de: 715,6 cm².

Os sensores MAF têm saída de leitura analógica por meio da variação de tensão, que vai de 0V a 5V, aumentando de acordo com o aumento da passagem de ar. Para tanto, a fabri-

cante disponibiliza um gráfico que apresenta a correlação entre a tensão de saída e a quantidade de ar que é devidamente medido. Para o modelo utilizado na realização deste trabalho, apresenta-se o gráfico na figura a seguir.

Figura 17: Gráfico de correlação entre tensão de saída e quantidade de ar medido no MAF.



Realizou-se uma regressão polinomial, pelo método dos mínimos quadrados, de sexta ordem na curva da figura 17 acima e se obteve a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ar} = & 1,00774 + 4,47812 \times 10^{-2}(U_a) - 4,02862 \times 10^{-4}(U_a)^2 + 2,20307 \times 10^{-6}(U_a)^3 - \dots \\ & \dots - 6,58409 \times 10^{-9}(U_a)^4 + 9,96427 \times 10^{-12}(U_a)^5 - 5,96741 \times 10^{-15}(U_a)^6 \end{aligned} \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde:

\dot{m}_{ar} é a massa de ar admitida contabilizada pelo sensor, em [kg/h];

U_a é a saída do sensor, em [V], que varia de 0V a 5V.

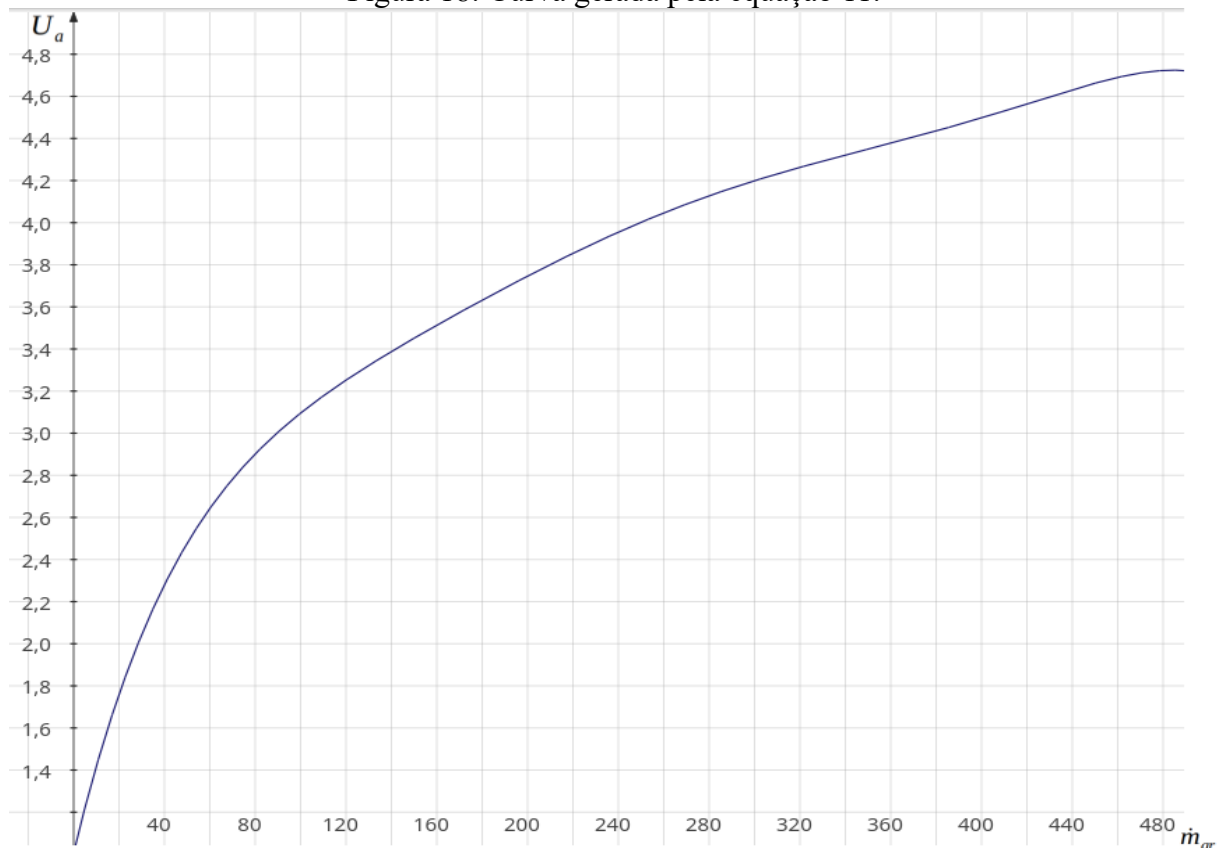
A obtenção dos dados numéricos no gráfico da figura 17 se deu pelo software Engauge Digitizer e a regressão polinomial se realizou com o software SciDAVis, ambos os softwares livres e de distribuição gratuita. Os dados obtidos estão disponíveis no Apêndice B.

Tal curva e expressão apresentados acima são sugestões, com base nos dados fornecidos pelas fabricantes, para a calibração dos sensores MAF, considerando que estes não foram feitos para trabalhar nestas condições de uso, muito menos juntamente ao Arduino. Outro

meio possível de se fazer tal calibração se dá através do volume de ar teoricamente admitido a cada rotação do motor, mas esta abordagem dedutiva não será apresentada neste trabalho.

Para fins de verificação, a curva gerada pela equação 11 se apresenta a seguir. Percebe-se que o método dos mínimos quadrados não apresenta boa resolução nos extremos do gráfico, especialmente, neste caso, no fim da curva.

Figura 18: Curva gerada pela equação 11.



3.4 PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS

Destacam-se neste capítulo os procedimentos padrões que devem ser seguidos, a fim de se evitar erros e acidentes, sempre que se inicia um teste na bancada dinamométrica.

Recomenda-se que em toda e qualquer prática experimental deve-se observar os requisitos de segurança, tanto pessoal quanto ao equipamento. São alguns destes nesse caso:

- Por se tratar de um motor de combustão interna é necessário que os experimentos se realizem em um local aberto a fim de evitar sufocamento por gases resultantes de combustão;
- Uso de EPI individual, especificamente óculos, proteção auricular e proteção térmica;
- Tomar devida distância do motor e do freio dinamométrico, pois os mesmos geram muito calor.
- Checar o nível de óleo do motor e abastecer, caso necessário completar com o óleo recomendado até o nível indicado. No caso do motor utilizado, o óleo recomendado pela fabricante do motor é o SAE 20W50 (BRANCO: B4T – 5.5 HP);
- Verificar o nível de combustível e completar se necessário;

São estes os procedimentos corretos realizados para partida do motor e obtenção de dados:

- i. Ligar o sistema de medições. Verificar visualmente seu funcionamento;
- ii. Ligar o motor: Primeiramente, abre-se o acelerador para deixar o motor em meia aceleração, em seguida se coloca o afogador na posição (1) “afogado” para liberar combustível ao motor para facilitar a partida;
- iii. Esperar que o motor atinja a temperatura ideal de trabalho, indicada na tela LCD pelo quatro sensores nomeados **T1**, **T2**, **T3** e **T4** em torno de 80°C;
- iv. Realizar os procedimentos de medição: Acelerar o motor na rotação desejada, puxar a alavanca e verificar a queda de rotação requerida, tomar nota de todas as medidas de sensores e periféricos;
- v. Desligar o motor.

O escalonamento de rotações, do item *iv* acima, é realizado de acordo com o experimento, que pode ser torque máximo, potência máxima ou curvas de torque, potência e consumo específico.

4 RECURSOS

Apresentam-se aqui os principais recursos necessários a realização deste projeto. Conforme consta no capítulo introdutório, especificamente na justificativa, este projeto é uma colaboração entre alunos e professores da universidade, não tendo ajuda financeira de nenhuma organização pública ou privada.

4.1 RECURSOS MATERIAIS

O quadro abaixo apresenta os principais recursos utilizados na elaboração do projeto.

Quadro 4: Recursos materiais utilizados na elaboração do projeto.

Item	QTD.	Detalhes
Sensor termopar tipo K	1	Sensor de aferição de temperaturas elevadas.
Módulo MAX6675	1	Circuito de transdução para sensores termopar.
Sensor tipo MAF	2	Sensor de aferição de fluxo de ar.
Sensores DS18B20	4	Sensor de aferição de temperaturas não elevadas.
Arduíno Uno R3	1	Micro computador programável para utilização com sensores periféricos.
Tela LCD 20x4	1	Tela em tamanho ideal para captação de 7 informações, com seus respectivos detalhes.
Módulo serial I2C	1	Controlador de telas LCD
Fonte 12V, circuitos de redução de tensão.	1	Fonte 12V e circuitos de redução de tensão para 9V e 5V.

4.2 RECURSOS FINANCEIROS

A tabela a seguir apresenta os valores dos principais recursos utilizados na realização do projeto.

Tabela 1: Recursos financeiros necessários para realização do projeto.

IMPORTÂNCIA	FINALIDADE	QTD.
R\$ 259,76	Sensores MAF	2
R\$ 75,00	Arduíno Uno R3	1
R\$ 67,00	Sensores DS18B20	4
R\$ 57,50	Tela 20x4 e módulo serial I2C	1
R\$ 43,00	Sensor termopar tipo K e módulo MAX6675	1

R\$ 34,00	Fonte 12V e circuitos de redução de tensão	1
R\$ 32,00	Cabos elétricos e protoboard	-
R\$ 568,26	TOTAL	

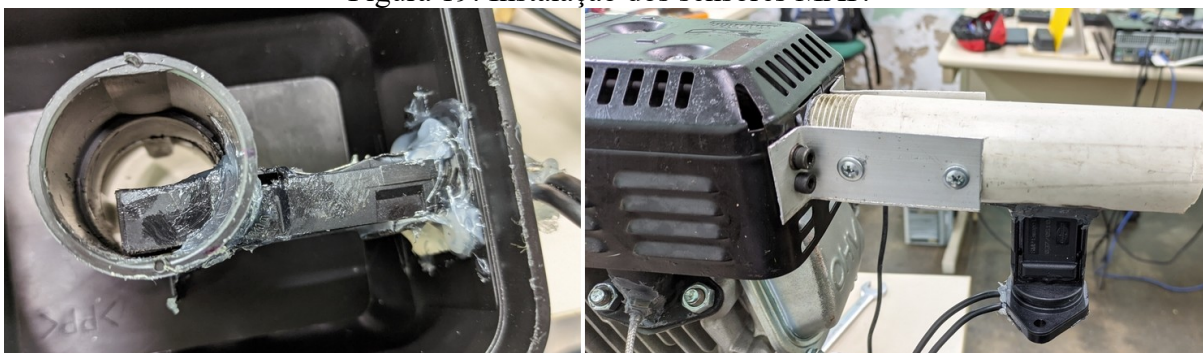
Comenta-se que este custo é considerado relativamente baixo, considerando que o custo inicial unitário de sensores automotivos e/ou industriais podem partir de até duas ou três vezes o valor total disponibilizado na tabela 1.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA

Conforme fora planejado, construiu-se o sistema de aferições. A figura abaixo mostra a instalação dos sensores MAF, um no filtro de ar e outro após o escapamento do motor.

Figura 19: Instalação dos sensores MAF.

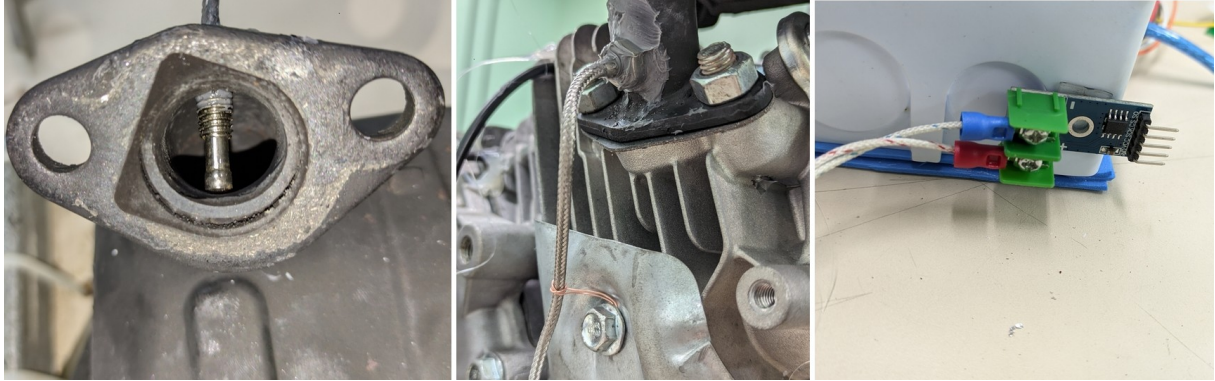


Fixou-se o sensor MAF de entrada com silicone de cura acética pelo tubo interior e silicone de baixo ponto de fusão pelo exterior. Para o sensor MAF de saída, elaborou-se com barras de alumínio, parafusos, porcas e tubulação de PVC com diâmetro interno próximo de 32mm um prolongamento do escapamento do motor e se fixou o sensor MAF com silicone resistente a altas temperaturas. A adoção desses modelos de fixações devem garantir que os sensores resistam melhor as vibrações resultantes do funcionamento do motor.

Estima-se, inicialmente, que os gases sejam resfriados o suficiente até a saída do escapamento para que não haja danos por alta temperatura no equipamento.

A figura abaixo mostra a instalação do sensor de alta temperatura na entrada do escapamento do motor e o módulo MAX6675.

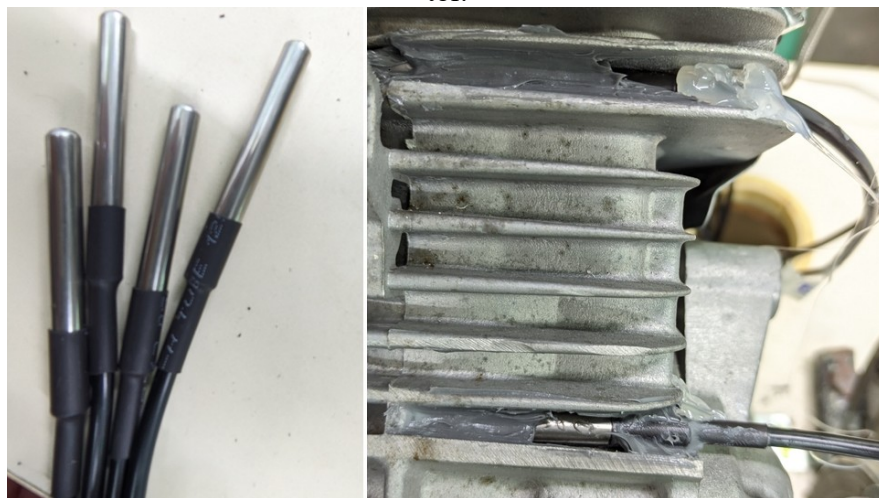
Figura 20: Instalação do sensor termopar de alta temperatura e módulo MAX6675.



Realizou-se um furo de 6mm com auxílio de furadeira e se fez rosca para fixação do sensor de alta temperatura. Colocou-se silicone a fim de se evitar vazamentos, pois o sensor possui um espaço livre entre o elemento roscável e o elemento sensor. Júnior e Rodrigues, 2015, estimam que a temperatura na saída do escapamento de um motor de médio porte a diesel esteja em torno de 405 °C. Rigon, 2018, apresenta que essa mesma temperatura em um motor de pequeno porte a gasolina esteja em torno de 230 °C, com máxima de 300 °C.

A figura abaixo mostra os sensores de baixa temperatura DS18B20 e os locais e método de fixação no corpo do motor.

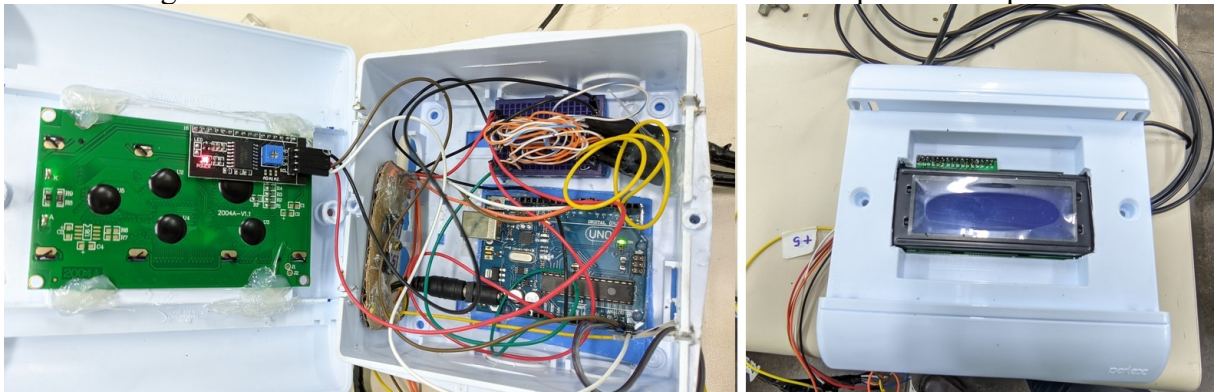
Figura 21: Sensores DS18B20, local de instalação no corpo do motor.



Os sensores DS18B20 foram instalados em contato direto com o corpo do motor e as aletas de resfriamento do mesmo. Limpou-se local de assentamento, passou-se pasta térmica a fim de melhorar a troca de calor e se fixou os sensores com silicone resistente a altas temperaturas. Ressalta-se, conforme se apresenta na figura 21, que se utilizou silicone de baixo ponto de fusão para fixação inicial dos sensores, pois o silicone resistente a altas temperaturas tem o tempo de cura muito mais demorado.

A figura abaixo mostra o sistema elétrico acomodado em uma caixa plástica adaptada.

Figura 22: Elementos eletrônicos acomodados em caixa plástica adaptada.



Fixou-se a caixa plástica na mesa da bancada dinamométrica com fita dupla face e emborrachado, a fim de evitar vibrações excessivas provenientes do funcionamento do motor.

A figura abaixo mostra o sistema em seu primeiro funcionamento, sem que o motor estivesse ligado.

Figura 23: Tela LCD apresentando dados lidos dos sensores.



5.2 PROBLEMAS OCORRIDOS NAS PRIMEIRAS TENTATIVAS DE TESTES

O quadro a seguir apresenta os problemas ocorridos durante a primeira tentativa de realização de testes e as principais causas hipotéticas dos mesmos.

Item	Problema	Principais causas hipotéticas
1	Pane na tela LCD do Arduíno	Falta de filtros capacitivos em pontos específicos do circuito; Excesso de vibração por parte do motor, causando mau contato nos plugues removíveis; Possível interferência eletromagnética por parte do motor.
2	Possível excesso de temperatura no sensor MAF do escapamento	Conforme estimativa inicial, o escapamento não troca calor o suficiente para que o sensor MAF suporte a temperatura na saída do escapamento.

Detectaram-se estes problemas na primeira tentativa de testes. Quanto ao primeiro problema, pode ser facilmente resolvido reprojutando os circuitos elétricos para o suportar as intempéries impostas pelo funcionamento do motor, incluindo também os capacitores em pontos específicos no circuito. Infelizmente, para algumas melhorias é necessário que se altere a estrutura original do motor, o que não foi realizado por ser um dos objetivos do trabalho.

Quanto ao segundo problema, sugere-se a colocação de um trocador de calor no fim do escapamento ou, até mesmo, a substituição do escapamento por um trocador de calor. Isso possibilitará, dependendo do projeto de trocador de calor, que os gases resfriem o suficiente para que o sensor MAF trabalhe com temperaturas aceitáveis. Estão disponíveis em lojas de peças automotivas diversos tipos de trocador de calor, incluindo também alguns especialmente projetados para gases de escapamento de motores.

6 SÍNTESE CONCLUSIVA E CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho de monografia objetivou-se na elaboração de um sistema de baixo custo capaz de aferir vazão de ar, vazão de gases, temperatura de saída dos gases e temperatura média do corpo de um motor monocilíndrico da bancada do laboratório de ciências térmicas da UEA/EST. Para isso, utilizou-se do Arduino e de alguns sensores.

Apresentaram-se estudos em forma de revisão teórica relativo aos principais elementos que compõem a bancada fora necessário para a elaboração do sistema proposto. Além disso, apresentaram-se também algumas discussões a respeito do uso dos motores de combustão interna na atualidade.

Concluiu-se que é possível projetar e construir sistemas de baixo custo capazes de aferir dados termodinâmicos com uso do Arduino e aplicá-los em um motor de combustão interna. No entanto, quando as características do projeto requerem elevada precisão, nem sempre é possível a obtenção de parâmetros a um baixo custo. Além disso, a ausência de soluções no mercado, neste caso em específico, sensores e periféricos compatíveis com o Arduino, podem limitar severamente a capacidade do sistema que se deseja projetar.

Seguiu-se que não foi possível a elaboração do sistema de medição de fluxo de combustível de forma integrada ao Arduino, pelo alto custo do sensor de fluxo para estas condições de uso. Com isso, afirma-se que, das hipóteses inicialmente levantadas, tem-se:

- A hipótese constando com o texto “projetando-se um sistema embarcado com Arduino equipado com sensores de vazão e temperatura em locais estratégicos que seja capaz de aferir e mostrar os dados requeridos”, é parcialmente aceita. Devido a falta de um sensor de fluxo, nem todos os dados são capazes de aferir por esse sistema;
- A hipótese constando com o texto “com esse sistema embarcado, verifica-se que é possível medir consumo específico de combustível e realizar balanços energéticos e exergéticos”, é rejeitada. Novamente, devido a falta de um sensor de fluxo, não é possível a realização da medição e cálculo destes itens.

Dos objetivos, o objetivo geral deste trabalho foi alcançado. Em relação aos objetivos específicos, tem-se que:

- O sistema fora evidenciadamente construído, conforme consta no capítulo 5 de análise dos resultados;
- Não é possível medir consumo específico de combustível;
- Não é possível realizar balanços energéticos e exeréticos.

Embora nem todos os objetivos específicos tenha sido atingidos, projetou-se e sugeriu-se a construção de um sistema alternativo simples, também de baixo custo, para a medição do fluxo de combustível, apresentado na figura 15. Além disso, o novo sistema projetado e construído neste trabalho abre oportunidade para realização de diversas melhorias nos sistemas já presentes na bancada dinamométrica.

Em relação aos problemas ocorridos nos primeiros testes, comenta-se que nem sempre um projeto novo e/ou inovador apresenta resultados desejáveis. É necessário que se realizem diversos ajustes e testes, que demandam tempo, para o amadurecimento do projeto, até que se atinja a plena estabilidade.

Embora o objetivo geral tenha sido atingido, o sistema elaborado é passível de diversas melhorias e pode ser usado como base para projetos futuros.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de melhorias para a bancada dinamométrica, apresentam-se algumas que podem ser exploradas futuramente. São elas:

- Realizar os ajustes necessários para que se atinja a estabilidade do projeto;
- Construção do sistema de medição de combustível, podendo ser o que é proposto neste trabalho;
- Integração do sistema de frenagem do dinamômetro ao Arduino;
 - Por meio de um sistema hidráulico de frenagem, através de um sensor de pressão;
 - Por meios mecânicos, através de um sensor do tipo célula de carga;
- Integração da medição da rotação do motor ao Arduino, através de um sensor próprio para esta finalidade.
- Realizar e verificar, quando for possível, o comportamento dos balanços energéticos e exeréticos do motor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Armando José Cardoso. Gestão de motores de combustão interna. 2013. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/55628588.pdf>>. Acessado: 10/11/2019.

ARDUINO. Arduino - Software, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>>. Acesso em: 04/03/2021.

ARDUINO. What is Arduino, 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>>. Acesso em: 10/12/2020.

BARCZAK, Rafael; DUARTE, Fábio. Impactos ambientais da mobilidade urbana: cinco categorias de medidas mitigadoras. Revista Brasileira de Gestão Urbana (Brazilian Journal of Urban Management), v. 4, n. 1, p. 13-32, jan./jun. 2012. Disponível em: <<https://periodicos.puc-pr.br/index.php/Urbe/article/download/5470/21038>>. Acessado em: 10/11/2019.

BERTOTI, Elvis. Caracterização dinâmica de uma bancada dinamométrica veicular de rolos duplos. UNICAMP, Campinas, 2018. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/331572/1/Bertoti_Elvis_M.pdf>. Acessado em: 10/11/2019.

BRANCO: B4T – 5.5 HP. Visão geral e especificação técnica. Disponível em <https://www.branco.com.br/la/pt_br/catalogo-de-produtos/motores/b4t5_5h.html>. Acessado em: 10/12/2020

BRUNETTI, Franco. Motores de Combustão Interna. Vol. I e II. Blucher. São Paulo. 2012.

BOSCH. Hot-film air-mass meter, type HFM 5. Disponível em: <<https://members.rennlist.com/jandreas/Bosch%20HFM5%20Sensors.pdf>>. Acessado: 04/03/2021.

CALVITI, Caetano Mariano Apostólico. Estudo do processo de desenvolvimento de motores de combustão interna. USP, São Paulo, 2008. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/dispo->

niveis/3/3151/tde-07042009-135012/publico/Dissertacao_Caetano_Calviti.pdf>. Acessado em: 10/11/2019.

COSTA, Yoge Jeronimo Ramos. Análises Energética e Exergética de um Motor de Combustão Interna Operando com Mistura de Diesel e Gás Natural. UFCG, Campina Grande, 2007. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/459/YOGE%20JERONIMO%20RAMOS%20DA%20COSTA%20-%20TESE%20PPGEP%202007..pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acessado em: 10/12/2020.

FERGUSON, Colin R. KIRKPATRICK, Allan T. Internal combustion engines: applied thermosciences. Wiley, 2016, Third edition.

FILHO, Arthur Monteiro; RODRIGUES, Marcos André Torrezani. Balanço Energético e Exergético de uma Pequena Central Termelétrica equipada com um Motor de Combustão Interna a Diesel. UFES, Vitória, 2015. Disponível em: <https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2015.1_-_arthur_e_marcos.pdf>. Acessado em: 10/12/2020.

FRITZING. Fritzing Download, 2021. Disponível em: <<http://fritzing.org/download/0.9.6b>>. Acesso em: 04/03/2021.

GRANDE, Paulo Campo. Novas tecnologias: a reinvenção dos motores a combustão. Revista Quatro Rodas, março de 2018. Disponível em <<https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/a-reinvencao-dos-motores-a-combustao/>>. Acessado em: 10/11/2019.

GlobalSpec Engineering360. Temperature Sensors Information. Disponível em: <https://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/temperature_sensing/temperature_sensors> Acessado em: 10/12/2020.

HAICAL, Rafael da Cruz. Desenvolvimento de um sistema de controle de dinamômetro para testes de motores de combustão interna. UFRGS, Porto Alegre, Junho de 2009. Disponível

em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/17626/000721132.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acessado em: 10/11/2019.

HATCH, Steve V. Computerized engine controls. [s.l.] Cengage Learning, 2009.

JUNIOR, Wilian Gatti; BARBOSA, Ana Paula Franco Paes Leme. A evolução da tecnologia de motores: um estudo preliminar. XV SEMEAD, outubro de 2012. Disponível em: <<https://seer.ufrgs.br/read/article/view/38250/30519>>. Acessado em: 10/11/2019.

KICH, Felipe de Mello. Bancada dinamométrica para a medição de rendimento de sistemas de transmissão mecânica. UFRGS, Porto Alegre, Junho de 2011. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/31444/000781222.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acessado em: 10/11/2019.

KOHUT, Julio Cesar. Monitoramento inteligente do fluxo de ar em motores a combustão interna. UTFPR, Garapuava, 2017. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11801/1/GP_COEME_2018_2_08.pdf>. Acessado em: 10/11/2019.

MARTINS, Jorge. Motores de Combustão Interna. Pubindústria, 2ª edição, 2006

MARTINAZZO, Claudomir Antônio; ORLANDO, Tailan. Comparação entre três tipos de sensores de temperatura em associação com arduino. Perspectiva, Erechim, v. 40, n. 151, p. 93-104, setembro/2016. Disponível em: <https://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/151_587.pdf>. Acessado em: 10/12/2020.

MARTINAZZO, C. A. et al. Arduino: uma tecnologia no Ensino de Física. Perspectiva, Erechim, v. 38, n. 143, p. 21-30, setembro/2014. Disponível em: <https://www.uricer.edu.br/site/pdfs/perspectiva/143_430.pdf>. Acessado em: 10/12/2020.

RIGON, Matheus Celoni. Projeto e implementação de um sistema de monitoramento para motores estacionários. Araçatuba, 2018. Disponível em: <<https://servicos.unitoledo.br/reposi->

torio/bitstream/7574/2025/3/TCC_MATHEUS%20CELONI%20RIGON.pdf>. Acessado 10/12/2020

MATTEDE, Henrique. Sensor de temperatura – Tipos e funcionamento!. Mundo da elétrica. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/sensor-de-temperatura-tipos-funcionamento/>> Acessado em: 10/12/2020.

MAXIMINTEGRATED. DS18B20 – Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>> Acessado em: 04/03/2021.

MAXIMINTEGRATED. Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple to-Digital Converter (0°C to +1024°C). Disponível em: <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MAX6675.pdf>> Acessado em: 04/03/2021.

MAYERSOHN, Norman. The Combustion Engine Refuses to Die: Internal combustion is surviving by adapting. Nautilus: Science Connected, novembro de 2013. Disponível em: <<http://nautil.us/issue/7/waste/the-combustion-engine-refuses-to-die>>. Acessado em: 10/11/2019.

MAYERSOHN, Norman. The internal combustion engine is not dead yet. New York Times News Service, agosto de 2017. Disponível em: <<https://www.nytimes.com/2017/08/17/automobiles/wheels/internal-combustion-engine.html>>. Acessado em: 10/11/2019.

MCROBERTS, Michael. Arduino Básico. Novatec, São Paulo, 2011.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; BOETTNER, Daisie D.; BAILEY, Margaret B. Princípios de Termodinâmica Para Engenharia, 7ª Edição. LTC, 2013.

PULKRABEK, Willard W. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Prentice Hall. New Jersey, USA. 2004.

SCHNEIDER, Paulo Smith. Medição de velocidade e vazão de fluidos. UFRG, 2000. Disponível em: <http://www.geste.mecanica.ufrgs.br/pss/medterm/vazao_mt.pdf>. Acessado em: 10/12/2020.

SCHIRNER, Wadir Nagel; RUDNIAK, Andréia. Avaliação das emissões gasosas de diferentes tipos de combustíveis utilizados e seus impactos ambientais. TECNO-LÓGICA, Santa Cruz do Sul, v.13, n.1, p.25-34, jan./jun. 2009. Disponível em: <<https://online.unisc.br/seer/index.php/tecnologica/article/view/839/696>>. Acessado em: 10/12/2020

SILVEIRA, Cristiano Bertulicci. Sensor de Temperatura: O Melhor para sua Aplicação. Citysystems, 2018. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/sensor-de-temperatura/>> Acessado em: 10/12/2020.

SOUZA, Marco Antônio Santos. Desenvolvimento de um dinamômetro de fricção de baixo custo para motores de baja SAE. UFF, Niterói, 21 de dezembro de 2017. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/7010/1/Projeto%20Final%20-%20Desenvolvimento%20de%20um%20dinam%20metro%20de%20fric%20a7%20a3o%20de%20baixo%20custo%20para%20motores%20de%20Baja%20SAE%20-%20sem%20assinaturas.pdf>>. Acessado em: 10/11/2019.

TILLMAN, C. A. Motores de Combustão Interna e seus Sistemas. Rede e-Tec Brasil, 2013.

VONBUN, Christian. Impactos ambientais e econômicos dos veículos elétricos e híbridos plug-in: Uma revisão da literatura, Texto para Discussão, No. 2123. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília, 2015. Disponível em: <<https://www.econstor.eu/bitstream/10419/121613/1/833842056.pdf>>. Acessado: 04/03/2021

APÊNDICE A: CÓDIGO FONTE IMPLEMENTADO NO ARDUÍNO UNO

```
#include <OneWire.h>
#include <Wire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <max6675.h>

const byte sensorPin = 2; // Pino de conexão do terminal de sinal do
DS18B20 com o Arduino

byte nSensoresDS = 0; // Variável número de sensores DS18B20

OneWire oneWire(sensorPin); // Instancia a classe OneWire com o nome "pin"
DallasTemperature bus(&oneWire); // Instancia a classe DallasTemperature
com o nome "bus"

LiquidCrystal_I2C lcd(PCF8574_ADDR_A21_A11_A01, 4, 5, 6, 16, 11, 12, 13,
14, POSITIVE); // Inicializa o LCD com o módulo I2C

float sensors[0]; // Vetor "sensors" armazena a Temperatura sensores
DS18B20

// Sensor alta temperatura MAX6675
int ktcS0 = 5; // Pino digital (S0)
int ktcCS = 6; // Pino digital (CS)
int ktcCLK = 7; // Pino digital (CLK / SCK)
MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcS0); //Instância MAX6675 nos pinos (CLK, CS,
S0)

float maf1 = 0.0; float maf2 = 0.0; // Variáveis dos sensores MAF

void setup() {
    bus.begin(); // inicializa o objeto sensor
    Serial.begin(9600); // inicia monitor serial
    lcd.begin(20, 4); // inicia lcd
    lcd.clear(); // limpa o display
    nSensoresDS = bus.getDeviceCount(); // obtem o número de sensores DS18B20
conectados
    delay(1000);
}
```

```

void loop() {
    // Leitura sensores DS18B20
    bus.requestTemperatures(); // permite a leitura
    // faz leituras de todos
    for (int i = 0; i < nSensoresDS; i++) {
        sensors[i + 1] = bus.getTempCByIndex(i);
    }

    maf1 = analogRead(A2)*(5.0/1024.0); maf2 =
    analogRead(A3)*(5.0/1024.0); //Leitura dos sensores MAF

    // Funções de impressão
    // Sensores MAF
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("M1: "); lcd.print(maf1); lcd.print(" M2:
"); lcd.print(maf2);

    // Sensores de temperatura DS18B20 no corpo do motor
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("T1: "); lcd.print(sensors[1]); lcd.-
print(" T2: "); lcd.print(sensors[2]);

    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("T3: "); lcd.print(sensors[3]); lcd.-
print(" T4: "); lcd.print(sensors[4]);

    // Sensor alta temperatura
    lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("Tgs: "); lcd.print(ktc.readCelsius());
}

```

APÊNDICE B: DADOS OBTIDOS NO SOFTWARE ENGAUGE DIGITIZER

Tabela 2: Dados obtidos no software Engauge Digitizer

Quantidade de ar (m³)	Tensão (V)	Quantidade de ar (m³)	Tensão (V)
1,66	1,02	231,20	3,90
5,74	1,24	240,38	3,95
10,84	1,45	249,56	4,00
15,94	1,67	259,76	4,02
22,06	1,86	268,94	4,07
28,18	2,03	279,15	4,10
35,32	2,20	288,33	4,14
43,48	2,37	298,53	4,19
50,62	2,51	301,59	4,19
59,81	2,63	311,79	4,22
68,99	2,73	320,97	4,27
78,17	2,85	331,17	4,29
87,35	2,94	341,38	4,34
96,53	3,04	350,56	4,36
101,63	3,09	360,76	4,39
110,82	3,18	370,96	4,43
121,02	3,26	380,14	4,46
130,20	3,33	390,34	4,48
140,40	3,40	401,57	4,51
149,58	3,47	411,77	4,53
159,78	3,52	420,95	4,58
168,97	3,59	431,15	4,60
179,17	3,64	441,35	4,63
188,35	3,71	451,56	4,65
197,53	3,76	460,74	4,67
201,61	3,76	470,94	4,70
211,81	3,81	481,14	4,72
220,99	3,86	491,34	4,75