



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**JÉSSICA POLLYANNA VEIGA WANZELER RODRIGUES**

**INSTRUMENTAÇÃO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO**  
**INTERNA CICLO OTTO USANDO ARDUINO PARA**  
**COLETA DE DADOS**

**Marabá**

**2019**

**JÉSSICA POLLYANNA VEIGA WANZELER RODRIGUES**

**INSTRUMENTAÇÃO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO  
INTERNA CICLO OTTO USANDO ARDUINO PARA  
COLETA DE DADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Faculdade de Engenharia Mecânica da Uni-  
versidade Federal do Sul e Sudeste do Pará em  
cumprimento às exigências para obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Henrique Cerqueira Costa Basquerotto

Coorientador: Prof. Me. Daniel Rodrigues Oliveira

Marabá

2019

## FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido por Samantha Andrade de Araújo, Brasileira, Bibliotecária com Registro do CRB-2 1463

Rodrigues, Jéssica Pollyanna Veiga Wanzeler

Instrumentação de um motor de combustão interna Ciclo Otto usando Arduino para coleta de dados / Jéssica Pollyanna Veiga Wanzeler Rodrigues – Marabá: [s.n.], 2019;

50 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. Faculdade de Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Henrique Cerqueira Costa Basquerotto

Co-orientador: Prof Me. Daniel Rodrigues Oliveire

Inclui bibliografia.

1. Motor de combustão interna. 2. Instrumentação. 3. Arduino.

CDD 23. ed.: 541.36

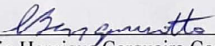


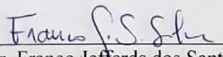
SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

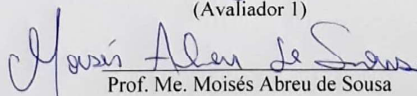
### ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

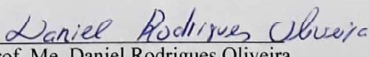
Ata de Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica de Jéssica Pollyanna Veiga Wanzeler Rodrigues.

Aos cinco dias do mês de julho de 2019, reuniu-se a banca examinadora do trabalho apresentado como Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica de JÉSSICA POLLYANNA VEIGA WANZELER RODRIGUES, intitulado: INSTRUMENTAÇÃO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO USANDO ARDUINO PARA COLETA DE DADOS. Compuseram a banca examinadora o Prof. Dr. Cláudio Henrique Cerqueira Costa Basquerotto (Orientador), o Prof. Dr. Franco Jefferds dos Santos Silva e o Prof. Me. Moisés Abreu de Sousa. Após a exposição oral, a candidata foi arguida pelos componentes da banca que se reuniram reservadamente, e decidiram, APROVA o trabalho com o conceito EXCELENTE. Para constar, redigi a presente Ata, que aprovada por todos os presentes, vai assinada por mim, Coordenador do Curso, Prof. Dr. José Elisandro de Andrade, e pelos demais membros da banca.

  
Prof. Dr. Cláudio Henrique Cerqueira Costa Basquerotto  
(Orientador)

  
Prof. Dr. Franco Jefferds dos Santos Silva  
(Avaliador 1)

  
Prof. Me. Moisés Abreu de Sousa  
(Avaliador 2)

  
Prof. Me. Daniel Rodrigues Oliveira  
(Avaliador 3)

*Dedico este trabalho a Deus,  
à minha querida família e amigos  
por tudo que eles representam na minha vida.*

# AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado forças para chegar até aqui, por ter guiado meus passos ao longo de minha vida, por ter colocado pessoas incríveis em meu caminho e por me permitir mais essa conquista.

À minha família, por todo amor, carinho e ensinamentos. À minha querida avó, Maria Isabel, que nunca mediu esforços para me ajudar, para me educar, para fazer as minhas vontades e, principalmente, para me amar. Às minhas avós, Suleima e Ana, que me ensinaram valores importantes para vida. Ao meu pai, Emanuel, e à minha mãe, Fátima, por incentivarem meus estudos, ajudando-me da melhor forma possível.

Às minhas tias, Nila, Isaura, Isabel e Irlanda, e à minha madrinha, Paulinne, que sempre estiveram ao meu lado em todas as fases da minha vida, acreditando em mim, sendo as minhas parceiras para todas as horas. Às minhas queridas companheiras de barquinho, Keth e Nívea, por toda amizade, confiança e amor. Aos meus queridos primos, Matheus e Arthur, com os quais aprendi e treinei minha paciência, mas que também foram as minhas fontes de energia diária ao longo desses anos.

Ao meu querido namorado, Luiz Renato, por caminhar junto comigo, por ser meu melhor amigo e um dos maiores incentivadores para que eu chegasse até aqui. À minha grande amiga, Débora Cristina, que me acompanhou durante todos esses anos, sempre me apoiando e me ajudando. Ao Adriano Souza, um grande amigo que ganhei no curso e que levarei para vida.

Ao meu Professor, Cláudio Basquerotto, que aceitou me orientar, sendo sempre uma pessoa disposta a me ajudar e a contribuir no desenvolvimento deste trabalho. Também agradeço ao Professor Daniel Oliveira, que foi um grande amigo e incentivador. Ao professor Moisés Sousa que esteve ao meu lado durante todo o trabalho, pela paciência, pelos conselhos, pelo apoio, pelas ideias, pela confiança e, principalmente, pela amizade.

Aos Engenheiros mecânicos, Antonilson e Edson, pelos esclarecimentos técnicos que foram indispensáveis para a conclusão desse trabalho.

À Faculdade de Engenharia Mecânica da Unifesspa, por todo o ensinamento proporcionado durante esses cinco anos de curso. Aos professores, que se esforçaram para que minha formação acadêmica fosse de excelência, apesar de todas as limitações que tivemos. Aos amigos de curso, em especial Roberto Nazareno, Rafaela Dutra e Allison Barreto, pelo convívio agradável e de muito respeito, pelas horas alegres, pelas trocas de materiais e pela união nos “momentos críticos”.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), Campus

Marabá Industrial, por toda infraestrutura oferecida para o desenvolvimento do trabalho.  
Aos meus amigos de vida, que estiveram comigo nessa trajetória, cada um de vocês teve um papel fundamental nessa conquista.

*A vida...  
É como um barquinho no mar!  
Nos exige paciência e força de,  
a cada dia, seguindo...  
Querer continuar.  
Tem dias...  
Que navegamos em calmarias  
Em outros...  
Precisamos tempestades superar  
Mas sempre continuamos!  
Mesmo sendo frágeis e tão pequenos  
Deus nos ampara diante dos desafios  
e nos permite também  
passarmos por ventanias para que  
aprendamos o valor dos Re(começos).  
No fim...  
O que nos resta é um novo horizonte  
Bem ali  
Ali na frente  
Mesmo que para nós pareça distante.  
O que jamais devemos permitir  
É afundar.  
Paula Monteiro*



## RESUMO

Os motores de combustão interna (MCI) são máquinas térmicas que transformam a energia química dos combustíveis a partir do processo de combustão em calor para logo ser convertido em trabalho mecânico. Nos dias atuais os motores apresentam cada vez mais a eletrônica embarcada, como é o caso da injeção eletrônica que controla o funcionamento dos motores através de sensores e atuadores mantendo um bom nível de eficiência e controle de emissões. Por isso, a instrumentação de motores tem ganhado cada vez mais espaço, crescendo e mudando rapidamente. O presente trabalho procurou instrumentar um motor de combustão interna, de um automóvel modelo Renault-Sandero 1.0 16V Flex, em uma bancada didática para coletar os dados e assim avaliar as variáveis do motor em funcionamento, em marcha lenta e/ou acelerado, tendo como meta utilizar uma plataforma de hardware livre e de baixo custo para a coleta de dados em tempo real.

**Palavras-chave:** Motor de combustão interna. Instrumentação. Arduino.

# ABSTRACT

Internal combustion engines (ICE) are thermal machines that transform the chemical energy of fuels from the combustion process into heat to be converted into mechanical work. Nowadays, the engines are presenting more and more the embedded electronics, as is the case of the electronic injection that controls the operation of the engine through sensors and actuators maintaining a good level of efficiency and emission control. That's why engine instrumentation has been gaining more and more space, growing and changing rapidly. The present work sought to instrument an internal combustion engine of a vehicle model Renault-Sandero 1.0 16V Flex car, in a didactic bench to collect the data and thus to evaluate the operating conditions, in low and high speed, aiming to use a free, low-cost hardware platform for real-time data acquisition.

**Keywords:** Internal combustion engine. Instrumentation. Arduino.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Representação dos ciclos de funcionamento de um MCI ciclo Otto. . . .	16
Figura 2 – Componentes do sistema de admissão de ar. . . . .	20
Figura 3 – Sensor MAF de película aquecida. . . . .	21
Figura 4 – Componentes do sistema de injeção eletrônica de combustível multiponto.	23
Figura 5 – Componentes do sistema de arrefecimento. . . . .	25
Figura 6 – Componentes do sistema de lubrificação. . . . .	26
Figura 7 – Ambiente de desenvolvimento do <i>Arduino</i> . . . . .	28
Figura 8 – <i>Arduino</i> Mega 2560. . . . .	28
Figura 9 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho. . . . .	30
Figura 10 – Fluxograma de instrumentação feita no trabalho. . . . .	31
Figura 11 – Motor Renault 1.0 16V Flex. . . . .	32
Figura 12 – Instalação do termistor no coletor de admissão de ar. . . . .	33
Figura 13 – Adaptação do termopar no cárter do motor. . . . .	34
Figura 14 – Instalação do termopar na carcaça da válvula termostática. . . . .	34
Figura 15 – Coletor de gases de exaustão com a instalação do termopar. . . . .	35
Figura 16 – Termistor colocado no tanque de combustível. . . . .	35
Figura 17 – Sensor lambda Bosh LSU 4.2. . . . .	36
Figura 18 – Relação entre valores de tensão $\times$ valores analógicos do sensor. . . . .	37
Figura 19 – Fator lambda $\times$ tensão. . . . .	38
Figura 20 – Sensor MAF instalado no coletor de admissão. . . . .	38
Figura 21 – Vazão mássica de ar $\times$ tensão. . . . .	39
Figura 22 – Temperaturas coletadas do motor. . . . .	40
Figura 23 – Tensão $\times$ fator lambda. . . . .	42
Figura 24 – Valores do fator lambda em marcha lenta. . . . .	42
Figura 25 – Fator lambda $\times$ temperatura dos gases de exaustão. . . . .	43
Figura 26 – Vazão mássica de ar $\times$ tensão. . . . .	44
Figura 27 – Vazão mássica de ar $\times$ temperatura do ar de admissão. . . . .	45
Figura 28 – Vazão mássica de ar $\times$ pressão do ar de admissão. . . . .	45
Figura 29 – Pressão de admissão de ar $\times$ rotação. . . . .	46
Figura 30 – temperatura de admissão de ar $\times$ rotação. . . . .	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas do <i>Arduino</i> . . . . .	29
Tabela 2 – Especificações técnicas do motor utilizado nas medições. . . . .	32
Tabela 3 – Relação entre as respostas dos valores analógicos e tensão. . . . .	36
Tabela 4 – Relação entre valores de tensão $\times$ fator lambda. . . . .	37
Tabela 5 – Relação de tensão $\times$ vazão mássica de ar no motor. . . . .	39

# LISTA DE ABREVIATURAS

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ECU	Engine Control Unit
MAF	Mass Air Flow
MAP	Mass Air Pressure
MCI	Motor de Combustão Interna
NOX	Óxido de Nitrogênio
NTC	Negative Temperature Coefficient
PLX-DAQ	Parallax Data Acquisition Tool
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PROCOVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículo

# LISTA DE SÍMBOLOS

$AF$	Razão ar-combustível
$IAT$	Temperatura do ar admitido
$\dot{m}_a$	Vazão mássica de ar
$\dot{m}_f$	Vazão mássica de combustível
$\Phi$	Mistura estequiométrica
$\lambda$	Fator lambda
$\eta_v$	Eficiência volumétrica
$\rho_a$	Massa específica do ar
$\rho_{ai}$	Massa específica do ar admitido
$P_a$	Pressão do ar admitido
$R$	Constante universal dos gases perfeitos
$n$	Fator empírico de ajuste

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>10</b>
1.1	Objetivo . . . . .	11
1.2	Organização do trabalho . . . . .	11
<b>2</b>	<b>BREVE REVISÃO DA LITERATURA SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA . . .</b>	<b>13</b>
2.1	Instrumentação de motores de combustão interna . . . . .	13
2.2	Considerações finais . . . . .	14
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA . . . . .</b>	<b>15</b>
3.1	Motores de combustão interna . . . . .	15
3.2	Processo de combustão dos motores . . . . .	17
3.3	Eficiência volumétrica do motor . . . . .	18
3.4	Sistema de admissão de ar . . . . .	19
3.5	Sensor MAF . . . . .	20
3.6	Sensor MAP . . . . .	21
3.7	Sistema de alimentação de combustível . . . . .	22
3.8	Sistema de arrefecimento . . . . .	24
3.9	Sistema de lubrificação . . . . .	25
<b>4</b>	<b>INSTRUMENTAÇÃO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA . . . . .</b>	<b>27</b>
4.1	O <i>Arduino</i> como sistema de aquisição de dados . . . . .	27
4.2	Software PLX-DAQ . . . . .	29
4.3	A instrumentação do motor de combustão interna utilizando <i>Arduino</i> . . . . .	30
4.4	Características do motor utilizado . . . . .	31
4.5	Coleta de dados do motor . . . . .	32
4.6	Valores coletados . . . . .	39
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>47</b>
5.1	Conclusões . . . . .	47
5.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	47
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>48</b>

# 1 Introdução

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) fundou o Programa de Controle da poluição do Ar por Veículos (PROCONVE), responsável por definir prazos, limites máximos de emissões de poluentes e determinar imposições tecnológicas para veículos nacionais e importados. Nos dias atuais, devido às exigências impostas pelos governos e pela sociedade, pesquisadores e fabricantes buscam e investem em tecnologia para controle de emissões de gases tóxicos, como também para oferecer uma maior eficiência energética aos motores de combustão interna (CÂMARA, 2006).

Devido à preocupação com a escassez de combustíveis fósseis no cenário atual e às exigências nas regulamentações para diminuição de emissões de gases poluentes para o meio ambiente, os motores de combustão interna devem oferecer uma alta eficiência e baixa emissão. Para satisfazer essa demanda, os engenheiros procuram melhorar tanto as características de desempenho quanto o comportamento dos motores de combustão interna, assim concentram seu interesse no domínio das técnicas relacionadas ao projeto ou às condições de operação dos motores (LEVENDIS; PANAGIOTOU; TASILM, 1990; DEBNATH; SAHA; SAHOO, 2013; GIAKOUMIS et al., 2013; PULKRABEK, 2014; LABECKAS; SLAVINSKAS; MAŽEIKI, 2014).

Os testes experimentais são importantes ferramentas para o desenvolvimento dos motores de combustão. A análise de diversos processos que ocorrem em um motor oferece uma gama de informações que podem ser usadas para melhorar o projeto de motores. Alonso et al. (2004), calcularam a corrente polarizada por um transdutor de pressão piezoelétrico, que enviava um sinal analógico proporcional à taxa de variação da pressão no cilindro do motor. Assim, os autores determinaram as condições do processo de combustão, mostrando a importância do experimento para a pesquisa com motores.

O desenvolvimento de tecnologias aplicadas em MCI tem proporcionado resultados como aumento da potência específica, durabilidade do motor, redução de consumo específico de combustível, aplicação de novos materiais, diminuição das emissões de poluentes, melhoria de dirigibilidade e aumento da eficiência de conversão de combustível (BUENO; VELÁSQUEZ; MILANEZ, 2009; AL-BUSAIDI, 2012).

Com o desenvolvimento tecnológico, tem-se atribuído cada vez mais importância às medições e análises de grandezas experimentais. Através do crescimento da informática e da instrumentação, a aquisição de dados de forma digital e o seu processamento por computador estão sendo usados para melhorar as técnicas de controle e monitoramento de motores de combustão interna. Para coletar essas informações, podem ser utilizadas placas de aquisição de dados, como MBED, *Hawkboard*, *Raspberry Pi*, *Odroid* ou *Arduino* (GAO



et al., 2013; MCROBERTS, 2015).

Dentre as plataformas de aquisição de dados, o *Arduino* é um pequeno computador programável para processar entradas e saídas, que podem ser digitais ou analógicas, entre os dispositivos eletrônicos e os componentes externos conectados a ele. Devido ser um *hardware* livre, possuir confiabilidade e versatilidade, o *Arduino* pode ser usado de forma autônoma, controlando diretamente vários atuadores e recebendo estímulos de vários sensores, ou pode ser ligado a um computador repassando informações e recebendo instruções de volta (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013; MCROBERTS, 2015).

O presente trabalho buscou instrumentar um motor de combustão interna de um automóvel modelo *Renault-Sandero* 1.0 16V Flex, em uma bancada didática para coletar os dados e assim avaliar as variáveis do motor instrumentado em marcha lenta ou quando é acelerado. Com isso, a meta principal deste trabalho de conclusão de curso é automatizar, através de uma plataforma de hardware livre e de baixo custo, a coleta e monitoramento de dados do motor em questão, em tempo real.

## 1.1 Objetivo

Instrumentar um motor de combustão interna Ciclo Otto em uma bancada didática e coletar as variáveis operacionais através da coleta de dados analógicos e digitais, utilizando uma plataforma Arduino de baixo custo.

## 1.2 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado nos seguintes capítulos:

- **Capítulo 1 - Introdução:** Apresentação da motivação, contribuições e objetivos do presente trabalho de conclusão de curso.
- **Capítulo 2 - Breve Revisão da Literatura Sobre Instrumentação de Motores de Combustão Interna:** Revisão básica da literatura mostrando algumas definições sobre motores de combustão interna e aplicações de sistemas de monitoramento de baixo custo.
- **Capítulo 3 - Fundamentação Teórica em Motores de Combustão Interna:** Descrição do embasamento teórico utilizado neste trabalho, apresentando as definições básicas na teoria de motores de combustão, em especial os de combustão interna de ciclo Otto, além de focar nas características das informações que são lidas e analisadas através da instrumentação de baixo custo.
- **Capítulo 4 - Instrumentação de um Motor de Combustão Interna:** Ilustra a aplicação do *Arduino* para a instrumentação de um motor de combustão interna.

São apresentados também os resultados obtidos e discussões em respeito a estes resultados.

- **Capítulo 5 - Considerações Finais:** Este capítulo apresenta as conclusões finais sobre o presente trabalho com propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros.

## 2 Breve Revisão da Literatura Sobre Instrumentação de Motores de Combustão Interna

Este capítulo apresenta uma revisão sucinta da literatura sobre a definição e a utilidade da instrumentação de baixo custo em motores de combustão interna. São apresentados e discutidos diferentes exemplos de uso em áreas das mais diversas possíveis. Por fim, as considerações finais são sumarizadas ao final do capítulo.

### 2.1 Instrumentação de motores de combustão interna

A instrumentação é um conjunto de componentes que ajudam na medição, controle e monitoramento de variáveis de processo, propriedades físicas e composições dentro de um sistema industrial ou operacional. Para classificar os instrumentos de medição são divididos em classes de utilidade, que podem ser: monitoramento, o qual visualiza as variáveis de medição e não controla; análise experimental de engenharia, nesse tipo de aplicação as medições fornecidas são utilizadas para uma análise e estudo posterior; e controle de processos, nesse caso os instrumentos são mais específicos para determinadas aplicações, como as industriais (ISMAIL; GONÇALVES; BENEVENUTO, 1998). No trabalho, a classe de aplicação para a instrumentação é a Análise Experimental de Engenharia, a partir desse entendimento buscou-se os equipamentos adequados para desenvolver as medições.

O responsável por coletar e armazenar as informações das variáveis medidas de funcionamento do motor e do ambiente que o cerca são os chamados sistemas de aquisição de dados. Assim, é possível realizar uma análise real ou posterior desses dados. Esses sistemas são fundamentados em placas de aquisição microcontroladas, que fazem a coleta, conversão e armazenamento dos dados para o formato digital, deixando-os mais acessíveis às observações (RIBBENS, 2017).

No trabalho de Langness, Mangus e Depcik (2014) foi desenvolvida uma célula de teste de baixo custo que permitia o controle do motor e de seus sistemas auxiliares. Os autores descrevem que os componentes necessários para a construção, instrumentação e operação da célula, foram obtidos por menos de U\$ 150,00. As análises foram realizadas usando programas personalizados. Para este trabalho, foram necessários três sistemas para coletar os dados, que inclui um sistema de baixa velocidade (10 Hz), um sistema de alta velocidade (43 kHz) e um sistema de gravação de emissões.

Para melhorar o desempenho do motor e reduzir as emissões de gases poluentes pelo escapamento, pesquisadores da *Piri Reis University* desenvolveram uma plataforma que recebia os sinais analógicos e digitais de controle e medição fornecidos por sensores e

atuadores instalados no motor; as informações eram condicionadas e exibidas na interface gráfica do usuário usando o Labview® e registradas por meio da transferência de sinais da sala de máquinas, onde estava instalado o motor, para a sala de controle computadorizada do motor. A instrumentação produziu resultados experimentais precisos e confiáveis em diferentes cargas e velocidades do motor (MERT et al., 2009).

Foi desenvolvido na Universidade Técnica de Opole um simulador de motor de combustão interna com ignição por centelha. Esse sistema fundamentou-se no *Engine Control Unit* (ECU), do motor da série Bosch® com o software 7.5 e utilizou a placa microcontroladora *Arduino*. Onde foi possível analisar os parâmetros do motor usando o sistema de diagnóstico *on-board* e a rede de dados CAN BUS sob diferentes condições de operação. Para este propósito, o simulador foi equipado com dispositivos adicionais que permitiram gerar sinais de entrada repetitivos para a ECU. Os sinais mais importantes eram as informações da posição instantânea do virabrequim e do eixo de comando de válvulas. Com isso foram recriadas condições momentâneas de operação do motor (MAMALA; BROL; GRABA, 2013).

Nos últimos anos, estão sendo cada vez mais utilizados sistemas embarcados, como o *Arduino*, para adquirir dados das variáveis de desempenho operacional em motores de combustão interna. JÚNIOR (2017) em seu trabalho, desenvolveu e utilizou sistema de aquisição automática de dados embasando-se na placa eletrônica *Arduino* para obtenção de valores de patinagem dos rodados e consumo horário de combustível de tratores agrícolas em tempo real. A comunicação do sistema foi via *bluetooth* com aparelho portátil (*tablet*) e armazenou os dados em cartão de memória.

## 2.2 Considerações finais

A partir desta curta compilação de algumas aplicações da instrumentação de baixo custo em motores de combustão interna, pode-se observar a grande faixa de utilização envolvendo essencialmente os tópicos:

- Diminuir o custo de instrumentação de motores de combustão interna;
- Entender de forma didática como é feita a instrumentação;
- Estabelecer relações entre as técnicas já existentes com as técnicas de aquisição de dados de baixo custo.

## 3 Fundamentação Teórica em Motores de Combustão Interna

A meta deste capítulo é fornecer ao leitor uma introdução sobre a teoria de combustão interna, motivando o seu uso para aplicações em motores. Também são apresentadas as principais definições e conceitos sobre combustão e ainda a obtenção dos parâmetros que podem ser medidos e analisados em um motor de combustão interna.

### 3.1 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna (MCI) são máquinas térmicas que transformam energia química de um combustível em energia mecânica. Esse processo de transformação é chamado de combustão, que é a queima de uma mistura ar-combustível dentro do motor. A energia térmica é então transferida ao fluido motor que, por sua vez, a transmite ciclicamente aos órgãos mecânicos da máquina (GUPTA, 2012).

Os MCI podem ser classificados quanto à forma de realizar trabalho como: motores alternativos, quando o trabalho é realizado pelo movimento de vaivém de um pistão no interior do cilindro convertido em rotação contínua por um sistema biela-manivela; motores rotativos, quando o trabalho é obtido de modo direto pelo movimento de rotação; e motores de impulso, em que o trabalho é realizado pela força de reação dos gases expelidos em alta velocidade pelo motor. Outro fator a ser analisado é que os motores alternativos são divididos em motores de ignição por faísca ou Otto e motores de ignição espontânea ou Diesel (MOZURKEWICH; BERRY, 1982; PETRESCU; PETRESCU, 2016).

Os motores de ciclo Otto utilizam os pistões para realizar o movimento de vaivém conforme os tempos do ciclo, subindo até o ponto onde a câmara de combustão oferece menor volume, Ponto Morto Superior (PMS), e descendo até o ponto onde a câmara apresenta maior volume, Ponto Morto Inferior (PMI). Nesse tipo de motor, o ar e o combustível são aspirados para dentro do cilindro e depois comprimidos até o PMS, onde então acontece a reação de combustão, que é iniciada a partir de uma descarga elétrica de tensão elevada, faísca, proveniente da vela de ignição. Esse tipo de ignição é também chamada de ignição comandada (MARTINS, 2006).

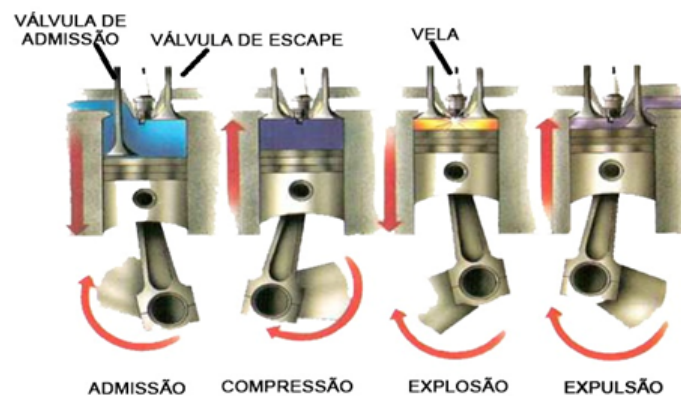
No ciclo Otto a cada duas voltas na árvore de manivela são realizados quatro tempos (MARTINS, 2006), conhecidos como:

- **Admissão:** nesse ciclo, com as válvulas de admissão abertas e as de escape fechadas, é admitido uma mistura de ar e combustível para dentro do cilindro, fazendo o pistão deslocar do PMS até o PMI.

- **Compressão:** nesse momento, com a válvula de admissão fechada, ocorre o deslocamento do pistão do PMI para o PMS, comprimindo assim toda a mistura admitida na câmara de combustão dentro do cilindro. Antes que o pistão esteja completamente no PMS é lançada uma faísca de centelha, produzida pelo sistema de ignição através da bobina e das velas, causando a queima da mistura comprimida e elevando a pressão dentro do cilindro.
- **Explosão:** com a elevada pressão causada pela queima da mistura ar-combustível o pistão desloca do PMS para o PMI. Nesse instante, tanto as válvulas de admissão como de escape ainda estão fechadas, e então ocorre a expansão dos gases, no qual a energia do combustível é extraída e transformada em movimento através da expansão elástica dos gases.
- **Expulsão:** agora, com as válvulas de escape abertas, o pistão desloca do PMI para o PMS, ocorrendo o escapamento dos gases da queima da mistura ar-combustível de dentro do cilindro para a atmosfera. E ao término deste ciclo, inicia-se novamente o primeiro.

A fig. (1) apresenta esses quatro ciclos do MCI ciclo Otto.

Figura 1 – Representação dos ciclos de funcionamento de um MCI ciclo Otto.



Fonte: Adaptado de Costa (2002).

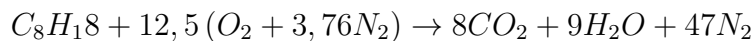
Os motores de combustão interna apresentam cinco sistemas complementares que proporcionam as condições necessárias para que o processo de transformação da energia química dos combustíveis em trabalho mecânico seja realizado de forma eficiente e contínua. Esses são conhecidos como: sistema de admissão de ar; sistema de alimentação de combustível; sistema de arrefecimento; sistema de lubrificação; e sistema elétrico (TILLMANN, 2013).

## 3.2 Processo de combustão dos motores

A combustão é uma reação química de oxidação, ou também denominada de reação química exotérmica, que ocorre no interior dos cilindros do motor. Nesse tipo de reação, os reagentes, combustível e o oxigênio presente no ar atmosférico, são quebrados e logo os átomos são reestruturados para compor os produtos, e assim liberar a energia desse processo. A dinâmica da combustão é iniciada através da faísca causada entre os eletrodos da vela de ignição, assim começa a queima e a propagação da chama que se estende para queimar todo o combustível. No entanto, após a geração da centelha, ocorre um atraso no início da queima em consequência das taxas de reações químicas no cilindro, o que é ligado diretamente às características físicas da relação ar-combustível, como quantidade de combustível, pressão e temperatura (BARRETO; RENDEIROS; NOGUEIRA, 2008; PULKRABEK, 2014; LIMA, 2017).

### 3.2.1 Estequiometria

A mistura ar-combustível estequiométrica é a considerada ideal. Nessa mistura, a quantidade de oxidante (oxigênio presente no ar) e o combustível são queimados completamente. A partir disso, é possível obter uma reação balanceada, gerando produtos da queima como o  $CO_2$  (dióxido de carbono),  $H_2O$  (água) e gases inertes presentes no ar atmosférico (PUJATTI, 2007). A seguir, tem-se a equação química balanceada do processo de combustão, considerando a gasolina ( $C_8H_{18}$ ) como combustível:



De acordo com o balanceamento, para uma molécula de combustível ser queimada completamente, são necessárias 12,5 moléculas de ar atmosférico. Nota-se, então, que para esse combustível a razão, ou mistura estequiométrica, é de 1:12,5. Adotando que o ar atmosférico possui aproximadamente 21% de oxigênio ( $O_2$ ), 78% de nitrogênio ( $N_2$ ) e 1% de outros gases, a relação ar-combustível é de aproximadamente 1:14,7 (GUZZELLA; ONDER, 2009).

### 3.2.2 Relação ar-combustível

A razão ar combustível pode ser calculada a partir da vazão mássica de ar e combustível (RAKOPOULOS et al., 2013)

$$AF = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \quad (1)$$

sendo  $AF$  a relação ar-combustível,  $\dot{m}_a$  a vazão mássica do ar e  $\dot{m}_f$  a vazão mássica de combustível. Rearranjando a eq. (1), pode-se obter também a razão de combustível ar a

partir de:

$$\frac{1}{AF} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \quad (2)$$

Outra informação que pode-se obter a partir das relações ar combustível e combustível ar é a razão entre a mistura ar combustível empregada e a mistura estequiométrica ( $\Phi$ ):

$$\Phi = \frac{\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}}{\left(\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}\right)_{\text{est}}} \quad (3)$$

A partir dessa equação, pode-se analisar o estado da mistura como sendo rica em combustível para valores de  $\Phi > 1$  e pobre em combustível para valores de  $\Phi < 1$ . Agora, se a mistura é considerada estequiométrica, ou seja, mistura perfeita o valor de  $\Phi$  é igual a 1.

Além da razão de equivalência mostrada acima, Martins (2006) apresenta também outro coeficiente que especifica a mistura ar-combustível, chamado de fator lambda ( $\lambda$ ). Para  $\lambda = 1$  a mistura está ideal, está estequiométrica. Para  $\lambda > 1$  a mistura é considerada pobre, ou seja, há mais oxigênio do que combustível. Por fim, se  $\lambda < 1$  a mistura é classificada como rica (com mais combustível do que ar) (WEPPNER, 1987).

### 3.3 Eficiência volumétrica do motor

Esse parâmetro é analisado com os dados da vazão mássica de ar no conduto de admissão dividida pela taxa que o volume de ar é deslocado pelo pistão e pode ser calculado a partir de (HEYWOOD, 1988):

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_a}{\rho_a (v_d) (N)} \quad (4)$$

sendo  $\eta_v$  eficiência volumétrica,  $\rho_a$  a densidade do ar em  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,  $\dot{m}_a$  a vazão mássica de ar admissão no cilindro em  $[\text{kg}/\text{s}]$ ,  $v_d$  a cilindrada do motor  $[\text{m}^3]$  e  $N$  número de rotações do motor por segundo.

A potência do motor é influenciada, principalmente, pela quantidade de ar admitida. Portanto, com o aumento da quantidade de ar introduzido, aumenta também a quantidade de combustível, com isso serão maiores a energia e a potência oferecida pela máquina (BRUNETTI, 2012).

No cálculo de eficiência volumétrica, precisa-se definir a densidade de admissão ( $\rho_a$ ) da mistura próxima à janela da válvula de admissão, quando é considerado isso, a medição analisa a qualidade de bombeamento do cilindro e das válvulas. Porém, quando não é possível fazer essa medição, usa-se a densidade atmosférica, fazendo a verificação próxima da tomada de ar do motor. Dessa forma, é usada a densidade do ar admitido ( $\rho_{ai}$ ) com a densidade da mistura ( $\rho_a$ ), o que resulta na eficiência volumétrica medida de acordo



com o desempenho do escoamento para todos os componentes do sistema de admissão. Logo, o uso desse método para os cálculos, chama-se eficiência volumétrica global, e pode ser determinada por (HEYWOOD, 1988):

$$\rho_{ai} = \frac{P_a}{R(T_a)} \quad (5)$$

sendo  $\rho_{ai}$  a densidade do ar admitido em  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,  $P_a$  a pressão do ar admitido em  $[\text{kPa}]$ ,  $R$  a constante do ar ( $0,287 \text{ kJ}/\text{kgK}$ ) e  $T_a$  a temperatura do ar admitido  $[\text{K}]$ .

Valores típicos da eficiência volumétrica para motores aspirados são de 80% a 90%. As variáveis que influenciam o rendimento volumétrico são:

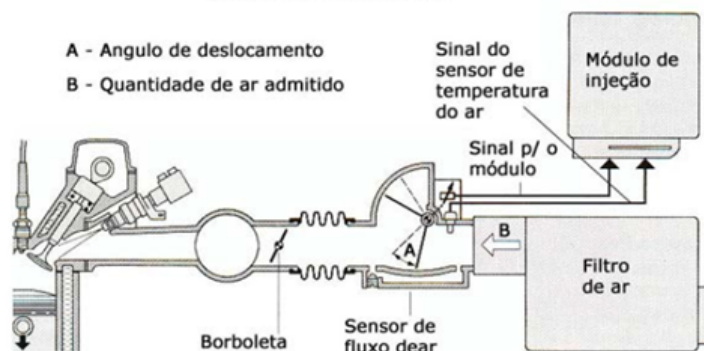
1. A densidade da carga e a diluição da mistura originada pelos gases residuais são de certa importância;
2. As paredes dos condutos de admissão e do cilindro transferem calor e elevam sua temperatura, diminuindo a densidade da carga, ocasionando uma perda no rendimento volumétrico;
3. A diminuição da temperatura devido à mudança de fase do combustível, favorece um aumento da eficiência volumétrica;
4. Os gases residuais presentes no cilindro depois do escape contribuem para diminuir a densidade da mistura;
5. A geometria do sistema de admissão e de escape tem grande importância. Os condutos de escape devem opor mínima resistência à saída dos gases e os de aspiração devem permitir a entrada de maior quantidade possível de ar;
6. Relação de compressão;
7. Rotação do motor;
8. Tempos de abertura e fechamento das válvulas são outras variáveis que influenciam no rendimento volumétrico.

### 3.4 Sistema de admissão de ar

O sistema de alimentação (admissão) de ar é responsável e projetado para suprir o motor de ar limpo (oxigênio) em quantidades que garantam o melhor rendimento do combustível durante o processo de combustão e, conseqüentemente, um bom funcionamento no motor. Nos motores de injeção eletrônica, os dados são enviados para a central de processamento, a ECU, que avalia e compara com os parâmetros preestabelecidos para o funcionamento do motor. Esse sistema é formado pelos seguintes componentes: filtro

de ar, corpo de borboleta, coletor de admissão, sensor de posição de borboleta, sensor de temperatura do ar, sensor de pressão absoluta e sensor de vazão de ar, como mostrado na fig. (2) (BRUNETTI, 2012).

Figura 2 – Componentes do sistema de admissão de ar.



Fonte: Adaptado de Costa (2002).

O coletor de admissão é responsável por conduzir os gases até as válvulas de admissão do motor (BOSCH, 2005). A quantidade de ar que será admitida tem relação direta com o ângulo de abertura da válvula borboleta, controlado pelo motorista com o pedal do acelerador e monitorado para cumprir as exigências de torque e carga submetido o motor. Portanto, além do acionamento pelo pedal, os sistemas de borboleta eletrônica oferecem um ajuste e controle da quantidade de ar admitido. Para estabelecer essa quantidade são feitas as medições através de métodos que podem ser: o direto, utilizando o sensor *Mass Air Flow* (MAF), ou o indireto, usando o sensor *Manifold Absolute Pressure* (MAP) que usa equações de correlação entre as propriedades físicas, como a pressão e a temperatura no coletor de admissão (CÂMARA, 2006; PUJATTI, 2007).

Durante o funcionamento do motor, o controle da mistura ar-combustível real deve ser mantido o mais próximo possível da razão estequiométrica, garantindo assim a proporção ideal entre os reagentes para que ocorra uma queima completa do combustível (gasolina), e com isso os únicos subprodutos finais desse processo serão o dióxido de carbono, água e nitrogênio. A partir desse controle ocorre maior aproveitamento do combustível usado, aumentando a eficiência térmica e minimizando os níveis de gases tóxicos (ALONSO et al., 2004).

### 3.5 Sensor MAF

Este sensor é utilizado para medir, diretamente, a massa de ar admitida pelo motor que é proporcional aos sinais de tensão ou de frequência variáveis. Essas informações são enviadas para a ECU que calcula a quantidade de combustível adequada a ser injetada nos

cilindros de forma a obter uma combustão completa. Por isso, o adequado funcionamento deste sensor é importante para atender às rígidas normas ambientais, impostas recentemente, para diminuir as emissões de gases tóxicos e para melhorar o desempenho do motor quanto ao consumo de combustível (BERNARDO, 2010). Existe uma variedade de modelos construtivos disponíveis no mercado, nesse trabalho foi usado o Sensor MAF de película aquecida (*hot-film*), como pode ser visto na fig. (3).

Figura 3 – Sensor MAF de película aquecida.



1-Tampa de passagem de medição; 2 -Sensor; 3-placa de montagem; 4-cobertura do circuito híbrido; 5-híbrido; 6-sensor de encaixe; 7-O-ring; 8-Sensor de temperatura auxiliar.

Fonte: Adaptado Costa (2002).

O funcionamento do Sensor MAF de película aquecida é baseado no circuito elétrico de ponte de **Wheatstone**<sup>1</sup>, dentro do sensor existem componentes resistivos que sofrem resfriamento conforme o fluxo de ar é admitido pelo motor, causando um desequilíbrio da ponte, e para reaquecer a película resistiva é necessária uma passagem maior de corrente elétrica para o circuito. Portanto, dentro do sensor existe um circuito eletrônico dedicado a transformar esse desequilíbrio da ponte em uma tensão elétrica que é proporcional à vazão mássica de ar que flui pelo sensor (HEISLER, 2002).

### 3.6 Sensor MAP

Esse tipo de sensor converte as medidas feitas da pressão absoluta no coletor de admissão em sinais elétricos que são enviados para ECU, que utiliza essas informações para realizar os cálculos de massa de ar admitida no motor, por isso é considerado um método de medição indireto. Durante o funcionamento do motor, em marcha lenta e com a borboleta de aceleração completamente fechada ou aberta, tem-se, respectivamente, uma alta ou baixa depressão no coletor de admissão (RIBBENS, 2017).

O método indireto, também chamado de medição por densidade versus velocidade (*Speed Density*), utiliza equações de correlação entre as propriedades físicas, como a pressão

<sup>1</sup> É um circuito elétrico eficiente para a realização de medidas precisas de resistência elétrica, composto por quatro resistores e um galvanômetro, sendo dois desses resistores conhecidos ou predeterminados, um deles de resistência variável e, por último, um de resistência desconhecida.

e a temperatura no coletor de admissão, para calcular a vazão mássica de ar admitida no motor (PUJATTI, 2007). Um sensor avalia a pressão absoluta no interior do coletor de admissão, enquanto outro avalia a temperatura do ar admitido, e através dessas informações é determinada a densidade do ar que, junto com uma área de corpo de borboleta conhecida, rotação e eficiência volumétrica do motor, é suficiente para determinação da vazão mássica com uma razoável precisão, dada por (VERMA et al., 1997; RIBBENS, 2017):

$$MAF = \frac{n(MAP)(V_d)(RPM)}{IAT} \quad (6)$$

sendo  $MAF$  a vazão mássica de ar em [g/min],  $n$  o fator empírico de ajuste,  $MAP$  a pressão absoluta no duto de admissão em [kPa],  $V_d$  a cilindrada do motor,  $RPM$  o número de rotações do motor por minuto e  $IAT$  a temperatura do ar ou da mistura ar-combustível admitida em [K].

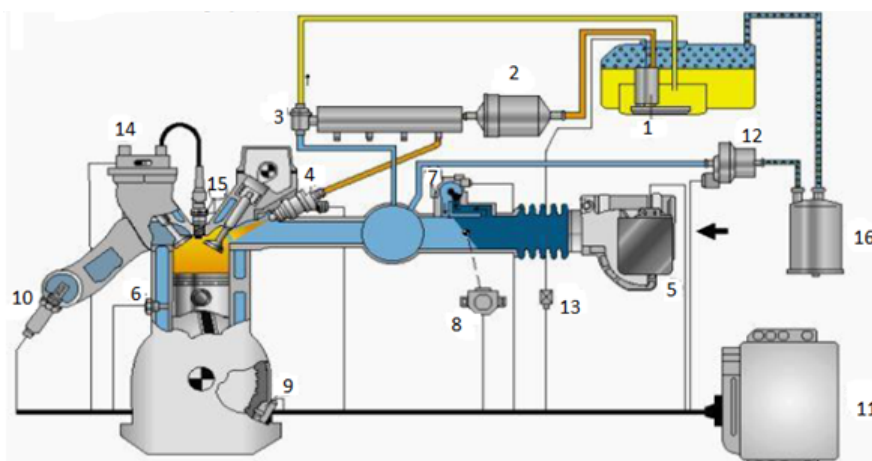
A partir dos resultados desse cálculo, a ECU consegue ter informações para controlar o fluxo instantâneo de combustível que será injetado nos cilindros pelos bicos injetores de modo a alcançar a razão estequiométrica da mistura ar-combustível (CIAMPA, 2011).

### 3.7 Sistema de alimentação de combustível

Esse sistema tem como função armazenar e filtrar o combustível necessário para o bom funcionamento do motor. Nos motores ciclo Otto, o primeiro sistema de alimentação de combustível utilizado foi o de injeção mecânica, que tinha alguns aspectos negativos como: necessidade de ser feita manutenção periódica (especialmente na limpeza) e não funcionava linearmente, o que ocasionava maior quantidade de emissão de gases poluentes e um alto consumo de combustível quando comparado com os motores de injeção eletrônica (LIMA, 2017).

O sistema de injeção eletrônica de combustível (Fig. (4)) surgiu com a evolução dos MCI e devido ao aumento das exigências nas normas ambientais para redução de emissões de gases poluentes. Esse sistema é capaz de fornecer a melhor dosagem de ar e combustível em cada condição de uso do motor, através da análise feita das informações coletadas pelos sensores, que informam as condições instantâneas de funcionamento do motor. Esses dados são mandados para a ECU, que analisa e compara com os parâmetros preestabelecidos de funcionamento do motor (BRUNETTI, 2012).

Figura 4 – Componentes do sistema de injeção eletrônica de combustível multiponto.



1-Bomba de combustível; 2-Filtro de combustível; 3- Regulador de pressão; 4- Válvula de injeção; 5- Medidor de fluxo de ar; 6-Sensor de temperatura; 7- Atuador de marcha lenta; 8- Potenciômetro da borboleta; 9- Sensor de rotação; 10- Sonda Lambda; 11- Unidade de comando (ECU); 12- Válvula de ventilação do tanque; 13- Relé de comando; 14- Bobina de ignição; 15- Vala de ignição; 16- Canister.

Fonte: Adaptado de Costa (2002).

O sistema de injeção eletrônica de combustível possui dois subsistemas: o de combustível e de ar. O primeiro subsistema é responsável por enviar combustível sobre pressão em todos os regimes de funcionamento do motor. Agindo da seguinte forma: a partir do momento que o motor entra em funcionamento, o sensor de rotação avisa a unidade de comando a sua rotação. Quando o pistão desce, é realizada uma pressão negativa (vácuo) no coletor de admissão, que aspira o ar da atmosfera e passa pelo medidor de fluxo de ar pela borboleta de aceleração, chegando até os cilindros do motor. O medidor do fluxo de ar mostra o volume de ar admitido para a ECU, que analisa então a quantidade de combustível ideal a ser injetada pelos bicos injetores, gerando assim uma mistura ar-combustível de acordo com a necessidade do motor. Após a combustão, os gases passam pela sonda lambda, que informa à ECU a quantidade de oxigênio presente nos gases de exaustão, assim é realizado um ajuste fino na quantidade de combustível injetado (BRUNETTI, 2012).

Além disso, faz parte desse sistema o canister, que é um filtro de vapor de combustível, com a função de controlar as emissões evaporativas. Os vapores acumulados no canister são admitidos pela depressão na tomada do coletor de admissão. O fluxo desses vapores é controlado pela válvula de purga. Essa válvula é comandada pela ECU, e, quando aberta, permite o fluxo de vapores ao coletor de admissão, promovendo assim a limpeza do canister de maneira ecológica (BRUNETTI, 2012).

Devido ao funcionamento, o sistema de injeção eletrônica apresenta diversas vantagens sobre sistema de carburação convencional como: maior controle de mistura ar-combustível, maior economia de combustível, melhor dirigibilidade (principalmente a frio),

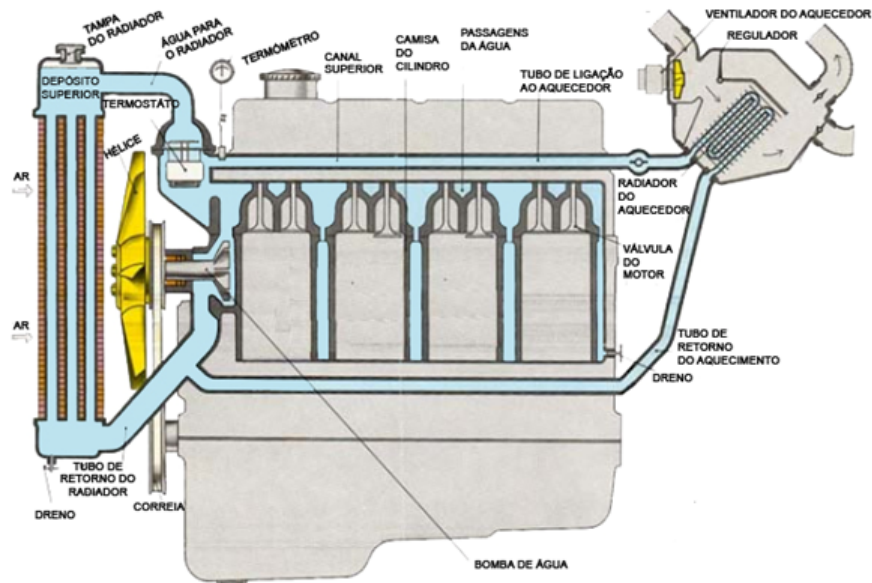
controle automático das rotações máxima e mínima e melhor controle do nível de emissões (BRUNETTI, 2012).

### 3.8 Sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento é o que realiza as trocas térmicas do motor com o meio ambiente, controlando sua temperatura de trabalho. O fluido de arrefecimento circula no bloco e cabeçote do motor e, posteriormente, dissipa o calor para o meio externo ao passar pelo radiador. Experimentalmente, esse calor é transferido ao fluido de arrefecimento nas faixas percentuais de 25% a 35% para os motores arrefecidos à água (GUZZELLA; ONDER, 2009). Quando os componentes internos do motor trabalham com elevada temperatura, pode acontecer deformação, corrosão, desgaste, degradação do óleo e engripamento (MERT et al., 2009). Portanto, é necessário que esse sistema opere corretamente, para garantir maior vida útil às peças internas.

A Fig. (5) mostra os principais componentes do sistema de arrefecimento: a camisa de água, que rodeia as partes quentes do motor, tais como os cilindros, as câmaras de combustão e as saídas do escapamento; o radiador, um trocador de calor que dissipa o calor do fluido de arrefecimento; o ventilador, que faz circular o ar através do radiador; as mangueiras existentes na parte superior e inferior do radiador e que ligam este ao motor para estabelecer um circuito fechado; a bomba d'água, que faz circular a água no interior do motor, normalmente o acionamento é feito por correia ou engrenagem a partir do eixo do virabrequim; a válvula termostática, que controla a temperatura do fluxo de água que circula pelo radiador em cada regime do motor; a tampa de pressão existente no radiador, que é destinada a elevar o ponto de ebulição da água, evitando, assim, a formação de bolsas de vapor junto às câmaras de explosão (FALCADE et al., 2013). Além disso, tem-se o fluido refrigerante, que percorre o motor, sendo capaz de resistir a temperaturas abaixo de 0 °C, sem congelar, e é capaz de lidar com temperaturas acima de 120 °C; esse líquido contém também inibidores de ferrugem (MERT et al., 2009).

Figura 5 – Componentes do sistema de arrefecimento.



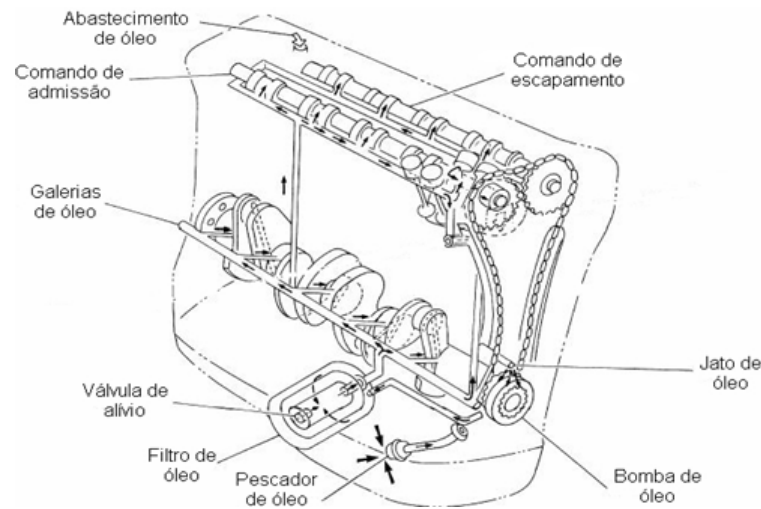
Fonte: Adaptado de Câmara (2006).

### 3.9 Sistema de lubrificação

O sistema de lubrificação insere o lubrificante entre as partes metálicas do motor, para diminuir o atrito e as dilatações excessivas durante o funcionamento. Os lubrificantes, que podem ser óleos minerais ou sintéticos, possuem a função de manter uma película desse líquido entre essas peças para dissipar o calor, vedar, limpar, reduzir o ruído do motor e remover as partículas geradas pelo desgaste nos locais de atrito, mantendo-as em suspensão (LEE, 2003).

A partir da Fig. (6), observa-se os componentes que atuam no sistema de lubrificação do MCI: o cárter, um reservatório de óleo, onde mantém uma quantidade suficiente desse fluido para atender o motor; Bomba de óleo, responsável por fazer circular o lubrificante entre as peças; Filtro de óleo, que filtra e retém as impurezas do óleo; Válvula reguladora de pressão, necessária para o controle e alívio de pressão do sistema, além de fazer o retorno de excesso para o cárter.

Figura 6 – Componentes do sistema de lubrificação.



Fonte: Adaptado de Câmara (2006).

Com o funcionamento do motor, as peças estão sujeitas a atritos que proporcionam um desgaste acentuado e, com isso, um calor muito grande. Para diminuir esse atrito e o calor gerado, a pressão de óleo lubrificante deve dispor de uma fina película desse líquido entre algumas peças com alta velocidade relativa, para garantir uma lubrificação hidrodinâmica, com atrito líquido através da separação das peças por intermédio do óleo (CÂMARA, 2006).

Além disso, o óleo lubrificante tem a tarefa de controlar a temperatura de funcionamento do motor, dissipando o calor para o ambiente. Uma parte do calor produzido é absorvido pelo óleo e transferido para o meio, através do cárter ou radiadores de óleo. Para melhorar a capacidade de refrigeração com o sistema de lubrificação, faz-se o uso de uma maior quantidade de lubrificante, assim esse líquido precisará de um tempo maior para que o óleo fique superaquecido; e também usa-se trocadores de calor no sistema de lubrificação, aletas no cárter, proporcionando uma maior área de contato, conseqüentemente uma redução na temperatura do lubrificante (CÂMARA, 2006).



## 4 Instrumentação de um Motor de Combustão Interna

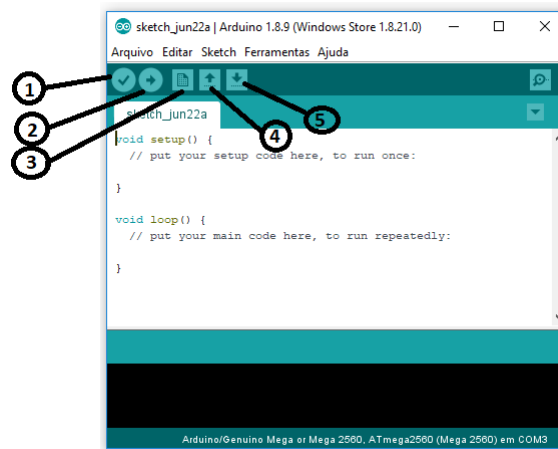
Este capítulo tem como meta apresentar a aplicação do *Arduino* como um sistema de aquisição para a análise de dados de um motor de combustão interna. Primeiramente são apresentados alguns conceitos sobre a plataforma de medição. Posteriormente é feita a medição das temperaturas e vazão mássica de ar, além da análise do fator lambda. São apresentadas algumas discussões dos dados medidos e analisados.

### 4.1 O *Arduino* como sistema de aquisição de dados

Com o *Arduino* é possível coletar variáveis ambientais e transformá-las em sinais elétricos com a utilização dos sensores conectados aos pinos de entrada da placa. Além disso, é praticável acionar ou controlar dispositivos eletrônicos ligados aos terminais de saída do *Arduino*. Esse sistema foi criado no ano de 2005 como um dispositivo que auxiliava no controle de projeto e/ou protótipos de forma menos dispendiosa em comparação aos que já existiam no mercado na época. Essa plataforma é formada por uma placa eletrônica (*hardware*) e um ambiente de desenvolvimento (*software*) para criação dos projetos (AL-BUSAIDI, 2012).

Atualmente, em razão da facilidade de uso e devido a uma enorme comunidade ativa que compartilha projetos, códigos e trabalhos em formato digital, o dispositivo vem ajudando e auxiliando outros na elaboração de novos projetos (FONSECA; ALEXANDRE, 2011). É uma placa eletrônica com o software disponível para ser executado em sistemas operacionais como Windows, Macintosh OSX e Linux, sendo de livre acesso, com facilidade de operação por ter uma linguagem simples, desenvolvida na biblioteca de escrita de linguagem C/C++ (ARDUINO, 2019). A Fig. (7) apresenta o ambiente de programação do *Arduino* e os seus principais comandos.

Figura 7 – Ambiente de desenvolvimento do *Arduino*.

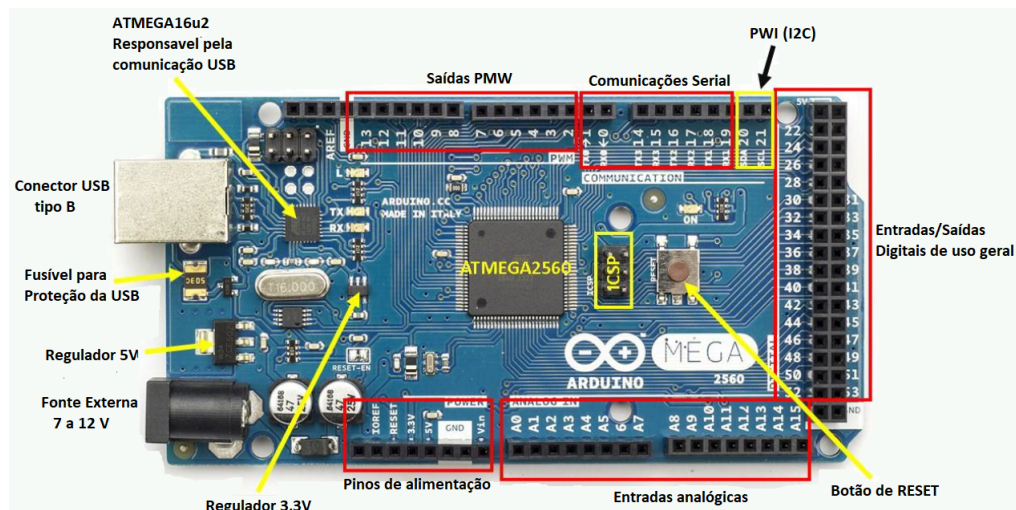


1- Verificar: analisa a condição do código (erros); 2- Carregar: compila o código e faz o upload; 3- Novo: cria um novo *sketch*; 4- Abrir: exhibe um menu com todos os *sketches*; 5- Salvar: salva os *sketches*.

Fonte: Elaboração própria do autor.

Existem diversos modelos de placa Arduino disponíveis para o uso, mas para o trabalho foi escolhido o Arduino MEGA (Fig. (8)), que possui algumas especificações técnicas, como mostra a Tab. (1) a seguir.

Figura 8 – *Arduino* Mega 2560.



Fonte: Adaptado de Embarcados, 2019.

Tabela 1 – Especificações técnicas do *Arduino*.

Componente	Especificação
Micro controlador	Atmega 2560
Tensão de operação	5 V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12 V
Tensão de entrada (limites)	6-20 V
Pinos de entrada e saída (I/O) digitais	54 (14 – podem ser saídas PWM)
Pinos de entradas analógica	16
Corrente DC por pino I/O	40 mA
Corrente DC para pino de 3,3V	50 mA
Memória Flash	256 kB (8 kB – <i>bootloader</i> )
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
Velocidade de Clock	16 MHz

Fonte: Elaboração própria do autor.

A partir da Tab. (1):

- **Memória flash:** é responsável pelo armazenamento dos dados por um intervalo de tempo sem a presença de corrente elétrica;
- **EEPROM:** eletricamente, é a memória não volátil, que pode ser várias vezes apagada e programada;
- **SRAM:** é a memória de acesso aleatório, que mantém os dados guardados, desde que esteja alimentando o *Arduino*.

## 4.2 Software PLX-DAQ

Neste estudo, foi utilizado o software da ferramenta *Parallax Data Acquisition Tool* (PLX-DAQ), que é uma ferramenta disponível para o sistema operacional *Windows*, que simplifica o recolhimento de dados da placa *Arduino* em uma planilha eletrônica. Assim, as informações obtidas podem ser armazenadas em um arquivo com o formato *.xlsm*.

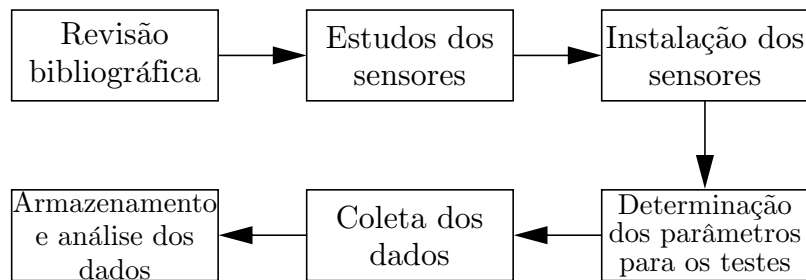
O software da ferramenta PLX-DAQ é gratuito que adquire até 26 canais de dados de qualquer microcontrolador. Com o uso desse suplemento é possível estruturar as amostras em colunas ou linhas dentro da planilha em tempo real. Como isso, há possibilidade de montagem de gráficos, cálculos e outras análises convenientes, sendo necessário apenas programar o código fonte. (STEVAN; SILVA, 2015).

### 4.3 A instrumentação do motor de combustão interna utilizando *Arduino*

O motor utilizado encontra-se no Laboratório de Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), Campus Marabá Industrial. A metodologia usada consistiu na instrumentação de um motor de combustão interna Ciclo Otto, em uma bancada didática para a pesquisa experimental acerca de alguns parâmetros operacionais do motor, como vazão mássica de ar, relação ar-combustível (valores da sonda lambda) e temperaturas em pontos específicos do motor.

Para ilustrar o processo metodológico, a Fig. (9) mostra as etapas que foram seguidas para o desenvolvimento e realização deste trabalho.

Figura 9 – Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.



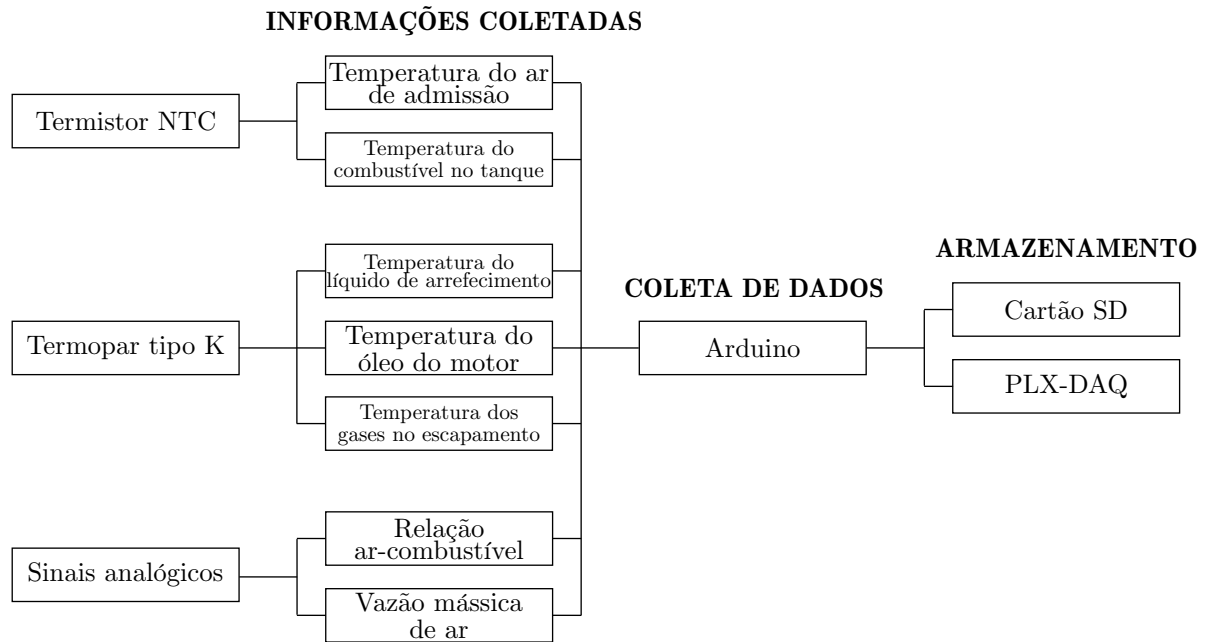
Fonte: Elaboração própria do autor.

Para instrumentar o motor de combustão interna, foi necessário instalar sensores para medições e monitoramento das variáveis desejadas para o trabalho em questão, valendo-se da plataforma Arduino para aquisição dos dados. Logo, foi possível analisar em tempo real e também salvar as informações para estudos posteriores. A Fig. (10) exemplifica o fluxograma de instrumentação feita no trabalho.

Para a executar os testes, os ajustes necessários foram os seguintes:

1. Fixação de um termistor NTC no tanque de combustível e no coletor de admissão do ar;
2. Instalação de um termopar tipo K no tubo do escapamento, no líquido de arrefecimento e no cárter do motor para medir as temperaturas, respectivamente, dos gases de exaustão, do líquido de refrigeração do motor e do óleo lubrificante;
3. Instalação de um sensor de vazão de ar (MAF) no sistema de admissão.

Figura 10 – Fluxograma de instrumentação feita no trabalho.



Fonte: Elaboração própria do autor.

Além disso, foram feitos procedimentos para a coleta dos sinais analógicos que foram convertidos e tratados para coletar as informações desejadas para o trabalho. Esses ajustes foram os seguintes:

1. Os valores do sensor Lambda foram coletados com o *hardware Arduino* e feitas as conversões para a unidade de tensão em Volts;
2. No sensor de vazão mássica de ar, as informações foram coletadas com o auxílio de uma programação direta no *Arduino*, em que essas eram obtidas e convertidas diretamente para dados de tensão em Volts.

#### 4.4 Características do motor utilizado

O motor utilizado na realização do trabalho foi um motor ciclo Otto, Flex com injeção eletrônica de combustível de marca *Renault* 1.0 16V (Fig. (11)). As características originais desse motor propiciam o funcionamento com os combustíveis álcool e gasolina em diferentes proporções.

Figura 11 – Motor Renault 1.0 16V Flex.



Fonte: Elaboração própria do autor.

A Tab. (2) apresenta as especificações técnicas do motor utilizado que foram fornecidas pelo fabricante do motor.

Tabela 2 – Especificações técnicas do motor utilizado nas medições.

Especificação	Valor
Número de cilindros	4 em linha
Diâmetro×Curso	69×66,8 mm
Cilindrada Total	999 cm <sup>3</sup>
Taxa de compressão	10:1
Potência Máxima com Gasolina	76 cv a 5850 rpm
Potência Máxima com Etanol	80 cv 5850 rpm
Torque Máximo com Gasolina	9,9 kgfm a 4350 rpm
Torque Máximo com Etanol	10,1 kgfm a 4350 rpm
Válvula por cilindro	4
Modelo	1.0 16 V Flex

Fonte: Elaboração própria do autor.

## 4.5 Coleta de dados do motor

Para registrar os sinais analógicos e coletar as informações dos sensores, usou-se uma placa microcontroladora *Arduino* MEGA (vide Tab. (1) para especificações) conectada a um computador. Após isso, foram armazenados os dados através do software da ferramenta PLX-DAQ, produzindo uma planilha em tempo real com as informações adquiridas.

Utilizou-se um *scanner* para a comunicação em tempo real com a ECU mostrando os dados coletados pelos sensores já instalados no motor de fábrica. Este equipamento foi responsável por monitorar a rotação do motor e a pressão absoluta na admissão do coletor. Foi utilizado também, o medidor de monóxido de carbono para analisar a concentração desse gás na tubulação do escapamento.

#### 4.5.1 Determinação das temperaturas

No trabalho foram utilizados dois tipos de sensores, os termopares do tipo *K* e os termistores NTC de 10 k $\Omega$ , para medir as temperaturas em pontos específicos do motor. Esses sensores foram comprados e já programados diretos no software do *Arduino*.

Foi instalado um termistor dentro do coletor de admissão e posicionado após o filtro de ar, para analisar a temperatura do ar que estava sendo admitido pelo motor durante os testes (Fig. (12)).

Figura 12 – Instalação do termistor no coletor de admissão de ar.



Fonte: Elaboração própria do autor.

Com o intuito de analisar o sistema de lubrificação do motor, buscou-se medir a temperatura diretamente no líquido lubrificante, e para uma maior precisão na leitura do

sensor que seria instalado, foi necessário analisar quais entradas do motor permitiriam acesso a esse óleo. Logo, foi feita uma verificação e observação da disposição do motor, e ficou evidente que a entrada com maior acessibilidade e menor interferência é da vareta de medição de óleo do motor. O sensor utilizado para medir a temperatura nesse sistema foi o termopar tipo *K*, vide Fig. (13).

Figura 13 – Adaptação do termopar no cárter do motor.



Fonte: Elaboração própria do autor.

Para ampliar a tubulação do escapamento, foi adaptada uma tubulação de aço com o objetivo de expelir os gases de exaustão para fora do laboratório. Neste cano foi instalado um termopar tipo *K* para medir a temperatura dos gases da combustão do motor (Fig. 14).

Figura 14 – Instalação do termopar na carcaça da válvula termostática.



Fonte: Elaboração própria do autor.

No sistema de arrefecimento do motor, foi instalado outro termopar tipo *K* dentro da carcaça da válvula termostática, junto à saída de água para calefação (Fig. 15).



Figura 15 – Coletor de gases de exaustão com a instalação do termopar.



Fonte: Elaboração própria do autor.

Por fim, foi feito na tampa do tanque de combustível um furo para posicionar o termistor NTC de 10 k $\Omega$ , (Fig. (16)).

Figura 16 – Termistor colocado no tanque de combustível.



Fonte: Elaboração própria do autor.

#### 4.5.2 Determinação do fator lambda

A fim de determinar o fator lambda, utilizou-se o sensor de oxigênio presente no motor (Fig. (17)). Esse sensor foi conectado à plataforma Arduino para coletar os dados

digitais no computador, evitando assim a necessidade de visualizar essas informações no painel da bancada do motor, como também para melhorar o estudo dos parâmetros operacionais.

Figura 17 – Sensor lambda Bosh LSU 4.2.



Fonte: Elaboração própria do autor.

Foi utilizado um multímetro para a coleta dos valores de tensão em Volts enviados pelo sensor que estava ligado ao *Arduino*. Assim, foi feita relação entre os valores analógicos obtidos no software do *Arduino* e valores de tensão do sensor (Tab. (3)).

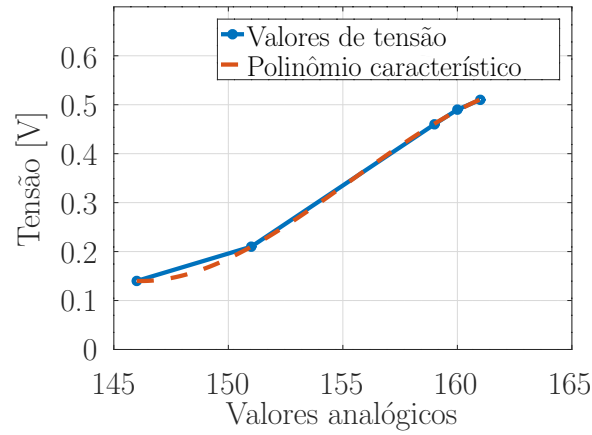
Tabela 3 – Relação entre as respostas dos valores analógicos e tensão.

Valor Analógico	Valores de tensão (V)
146	0,14
151	0,21
159	0,46
160	0,49
161	0,51

Fonte: Elaboração própria do autor.

A partir desses dados, pôde-se projetar a linha de tendência e obter a equação da reta aproximada para essa relação (Fig. (18)). Baseado nessas informações, foi escrito no *software* do *Arduino* a equação, o que deixou a coleta de dados automatizada em um computador.

Figura 18 – Relação entre valores de tensão × valores analógicos do sensor.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os dados encontrados estavam em Volts. Para correlacionar esses valores com o fator lambda, foi usada a tabela do manual técnico fornecido pela assistência (Tab. (4)).

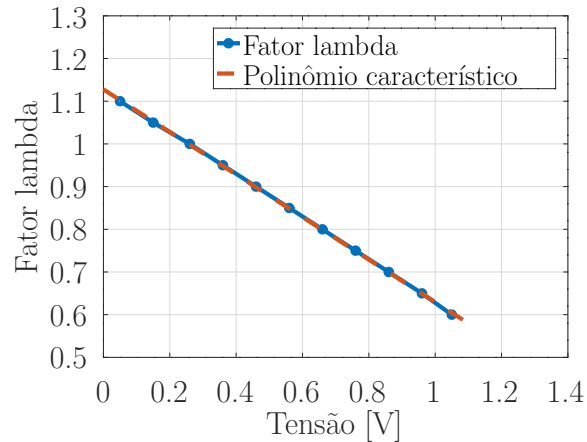
Tabela 4 – Relação entre valores de tensão × fator lambda.

Tensão (V)	Fator lambda
1,05	0,6
0,96	0,65
0,86	0,7
0,76	0,75
0,66	0,8
0,56	0,85
0,46	0,9
0,36	0,95
0,26	1
0,15	1,05
0,05	1,1

Fonte: Elaboração própria do autor.

Com a relação encontrada na tabela acima, foi projetada a linha de tendência e obteve-se a equação da reta aproximada para essa relação (Fig. (19)).

Figura 19 – Fator lambda × tensão.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

### 4.5.3 Determinação da vazão mássica de ar

Primeiramente, o sensor MAF foi instalado no mangote de ar de admissão. Além disso, o filtro de ar foi substituído por outro antes desse sensor (Fig. (20)), com o objetivo de evitar qualquer interferência durante a coleta de dados do sensor.

Figura 20 – Sensor MAF instalado no coletor de admissão.



Fonte: Elaboração própria do autor.

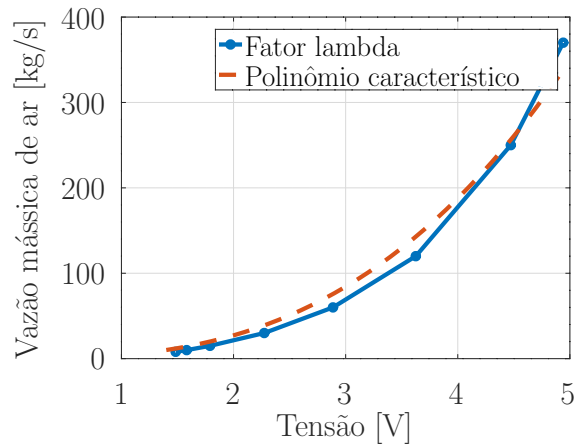
A vazão mássica de ar na entrada do motor foi determinada utilizando o sensor MAF da empresa *Bosch*®, que possui um catálogo que relaciona os valores de tensão enviados pelo sensor e a vazão mássica de ar (Tab. (5)).

Tabela 5 – Relação de tensão  $\times$  vazão mássica de ar no motor.

Tensão (V)	Vazão mássica de ar (kg/h)
1,239	8
1,3644	10
1,5241	15
1,8748	30
2,371	60
2,9998	120
3,7494	250
4,1695	370
4,4578	480

Fonte: Elaboração própria do autor.

A partir disso, foi possível traçar a linha de tendência e obter a equação da reta aproximada para essa relação (Fig. (21)). Após isso, foi escrita no *software do Arduino* a equação, dando então procedimento para a coleta dos dados da vazão mássica de ar de acordo com o funcionamento do motor.

Figura 21 – Vazão mássica de ar  $\times$  tensão.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 4.6 Valores coletados

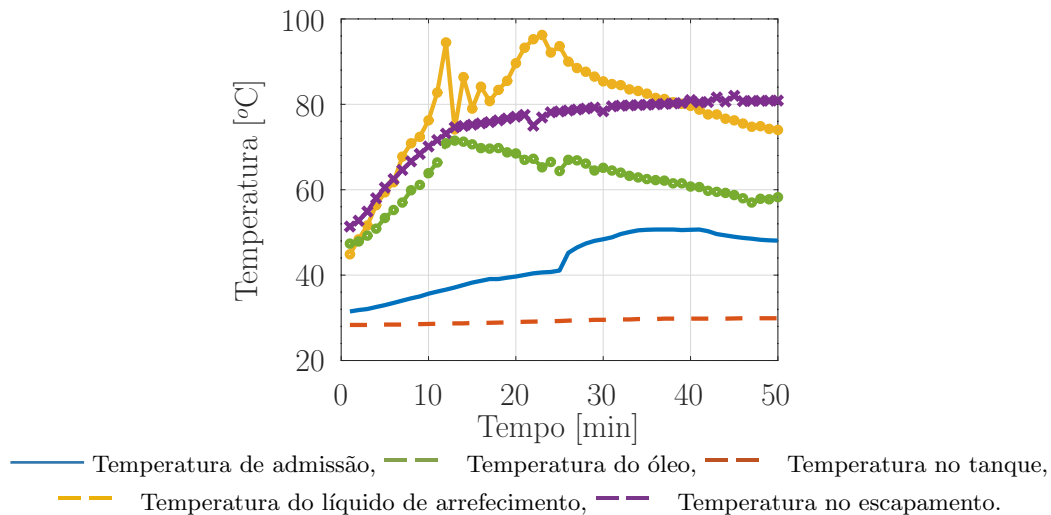
Esta seção apresenta os valores das variáveis que foram coletados do motor, tais como: temperatura do motor, fator lambda e tensão, fator lambda e temperatura dos gases de exaustão, vazão mássica de ar e tensão e a vazão de mássica e temperatura do ar de admissão.

### 4.6.1 Temperatura do motor

As temperaturas do ar de admissão, do combustível no tanque, do líquido de arrefecimento, dos gases no escapamento e do óleo de lubrificação foram medidas pelos sensores instalados no motor. Esses dados foram coletados com o *Arduino* e computados a cada minuto em um intervalo de 50 minutos. O motor, durante esse teste, encontrava-se em marcha lenta, com uma rotação em média de 775 RPM.

As temperaturas foram coletadas de maneira simultânea, para que fossem avaliadas nas mesmas condições. Observou-se um aumento nas temperaturas com o tempo, devido ao funcionamento do motor (Fig. (22)). Notou-se que, em aproximadamente 35 minutos de teste, as temperaturas tenderam a se estabilizar.

Figura 22 – Temperaturas coletadas do motor.



A análise dos dados de temperatura fornece a visualização do funcionamento da máquina, pois quando o motor atinge o regime permanente todas as temperaturas se mantêm constantes e os dados podem ser obtidos.

A temperatura do fluido de arrefecimento é um fator que tem forte impacto no funcionamento do motor, é controlada através da válvula termostática, radiador, ventoinha e outros sistemas de controle. Ela é mantida constante em torno de 90 °C, para controlar o desempenho do motor de acordo com as especificações de funcionamento. Quando a temperatura do líquido de arrefecimento for mais alta que a de referência, os componentes do motor sofrem maiores dilatações, gerando perdas das folgas, falta de lubrificação e atrito direto entre as partes metálicas, portanto, diminui a vida útil da máquina. Quando ocorre o contrário, os cilindros da câmara de combustão ficam a uma temperatura mais baixa, perdendo uma parte do calor para o sistema de arrefecimento, assim a eficiência térmica

diminui devido ao aumento das perdas, resultando no aumento do consumo específico de combustível para atingir a mesma potência.

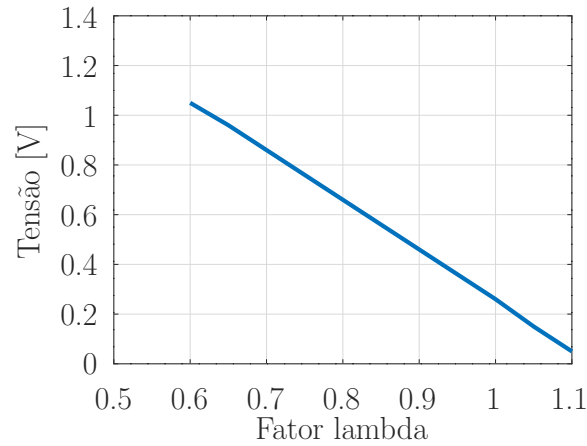
O aumento da temperatura do ar de admissão afeta diretamente a eficiência volumétrica e a razão ar-combustível. Se aumentar a temperatura do ar que entra no motor, sua massa específica diminui, diminuindo a concentração da massa, logo o enchimento do cilindro é menor. Por isso, alguns motores turbocomprimidos usam um trocador de calor que diminui a temperatura do ar e aumenta a eficiência volumétrica, podendo até ultrapassar os 100%. Se a massa de ar diminui no interior do cilindro a razão ar-combustível também diminui, ou seja, a quantidade de combustível injetado é menor e com isso tem uma redução da potência gerada.

O motor de combustão é uma máquina térmica de geração de potência, sendo assim, tem-se que uma parcela de energia é perdida para o meio ambiente. A maior parte dessa energia perdida é pelos gases de exaustão, então a temperatura desses gases fornece uma indicação da quantidade de calor que está sendo perdido para o meio, e se relacionada a fatores como à vazão mássica de combustível e poder calorífico inferior PCI. Além disso, com a quantidade de calor perdido para o sistema de arrefecimento pode-se calcular a eficiência térmica.

#### 4.6.2 Fator lambda e tensão

Ao relacionar fator Lambda e a tensão (V), notou-se que quando a medida de oxigênio do gás de escape é inferior à de referência (mistura rica), o sinal de saída obtido é geralmente de 700 a 900 mV (Fig. (23)). Quando a quantidade de oxigênio do gás de escape é superior à de referência (mistura pobre), o sinal de saída obtido é menor que 100 mV. A partir dos dados do valor lambda é possível determinar a quantidade do combustível utilizada para o funcionamento do motor, ou seja, se a mistura é rica (muito combustível) e pobre (pouco combustível).

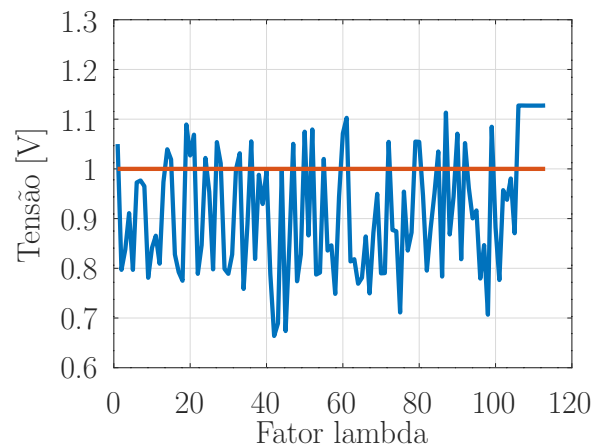
A quantidade de energia liberada na combustão assim como as emissões dependem da quantidade de massa de combustível e ar que reagem durante o processo de combustão. Para monitorar essas quantidades, é feita uma comparação entre a razão ar-combustível real e a razão ar-combustível estequiométrica.

Figura 23 – Tensão  $\times$  fator lambda.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A Fig. (24) mostra os valores do fator lambda ( $\lambda$ ) durante o funcionamento do motor, onde a condição da mistura é analisada, como rica, pobre, ou estequiométrica. As informações deste pode-se analisar a condição da mistura, como rica, pobre, ou estequiométrica. A quantidade de energia liberada na combustão assim como as emissões dependem da quantidade de massa de combustível e ar que reagem durante o processo de combustão. Para monitorar essas quantidades é feito uma comparação entre a razão ar combustível real e a razão ar-combustível estequiométrica. Para valores de  $\lambda$  maiores que um, a mistura é considerada pobre; valores de  $\lambda$  menores que um, a mistura é considerada rica; e, por fim,  $\lambda$  igual a um, a mistura é estequiométrica. Em motores a combustão interna esse parâmetro é mantido como mistura pobre, pois é interessante que todo o combustível injetado seja queimado completamente. Os motores Ciclo Otto trabalham com razões muito próximas da estequiométrica, mas isso varia dependendo da faixa de operação da máquina.

Figura 24 – Valores do fator lambda em marcha lenta.



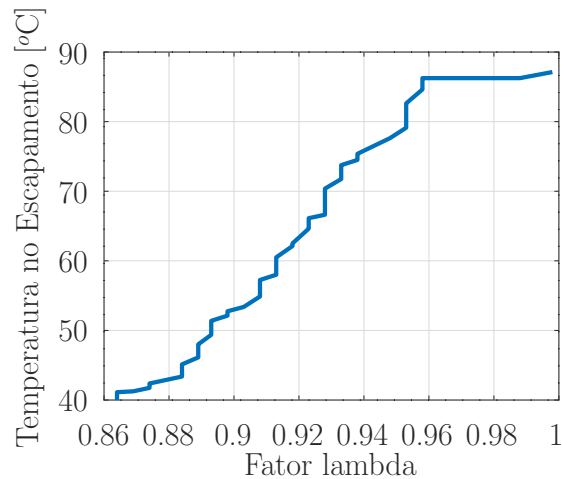
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.



### 4.6.3 Fator lambda e temperatura dos gases de exaustão

A condição para a coleta de dados foi com o motor em marcha lenta, ou seja, funcionando em baixa rotação, dessa forma, uma menor quantidade de ar e combustível era enviada aos cilindros. O fator lambda tem relação direta com a temperatura dos gases de exaustão (Fig. (25)), pois quando o motor funciona com uma mistura moderadamente pobre (fator lambda maior que um), há uma economia de combustível e uma maior quantidade de ar na mistura, isso causa o aumento da temperatura dos gases no escape. Conseqüentemente, ocorre um aumento das emissões de  $NOx$ , um gás nocivo ao meio ambiente, considerado um dos responsáveis pela chuva ácida, como também provoca a irritação nas mucosas.

Figura 25 – Fator lambda × temperatura dos gases de exaustão.



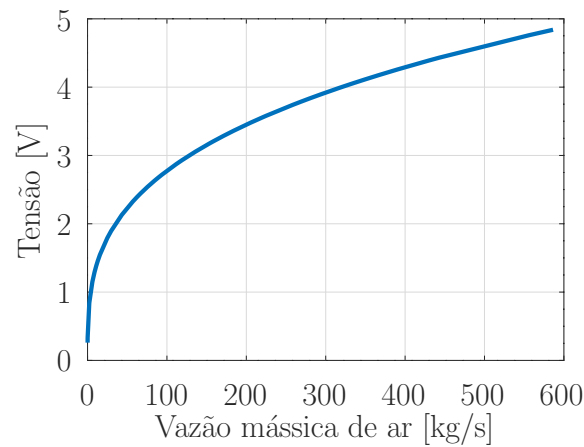
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Quando o motor funciona com uma mistura considerada rica (fator lambda menor que um), a potência do motor aumenta, porém há maior consumo de combustível, maior quantidade de hidrocarboneto não queimado expelidos pelo escapamento, o que ocasiona maior emissão de gases poluentes. Além disso, quanto mais rica for a mistura maiores são as chances de ocorrer um superaquecimento no catalisador.

### 4.6.4 Vazão mássica de ar e tensão

Os dados de vazão mássica de ar foram coletados usando o sensor MAF. Esse equipamento possui componentes resistivos que conforme o fluxo de ar admitido pelo motor influencia na tensão elétrica do sensor. Assim, aumentando a vazão mássica de ar, o sensor tende a aumentar a corrente de alimentação, que é transformada em sinal de tensão. A Fig. (26) mostra que a vazão mássica de ar tem relação direta com os valores de tensão, confirmando o observado na literatura.

Figura 26 – Vazão mássica de ar  $\times$  tensão.



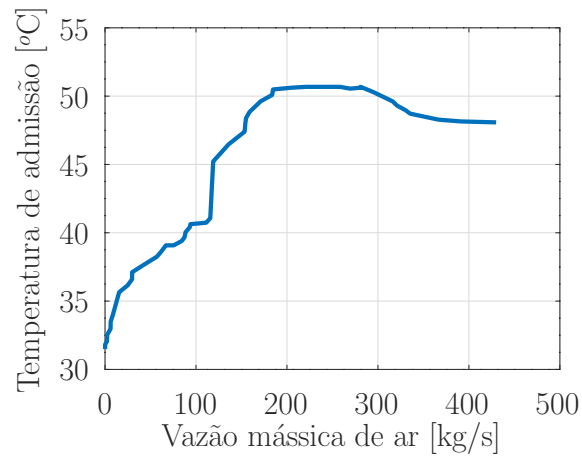
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Além disso, foi gerada uma equação que relaciona diretamente a vazão mássica de ar com a tensão, o que possibilitou a coleta de dados e a visualização do funcionamento real do motor, verificando que a vazão de ar aumenta de acordo com a rotação do motor e de diversos outros parâmetros que alteram durante o funcionamento.

#### 4.6.5 Vazão mássica $\times$ temperatura do ar de admissão, pressão de admissão e rotação

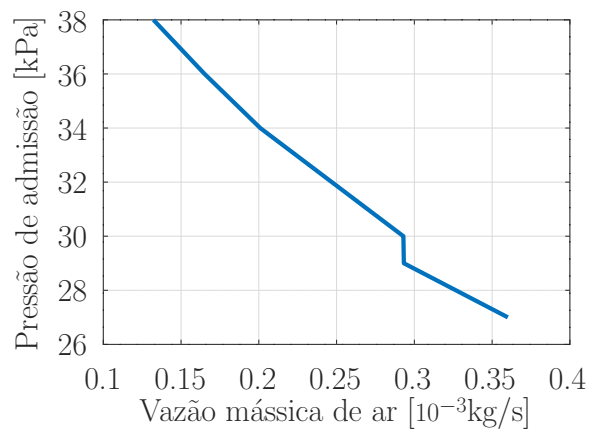
Durante o funcionamento do motor, quando a rotação sofre aumento, a razão ar e combustível também aumenta, tendo como consequência, uma maior vazão mássica de ar e de combustível injetado na câmara. Devido essa condição a temperatura do ar admitido aumenta, pois ocorre uma maior taxa de liberação de calor perdido para o meio figs. (27) e (28).

Figura 27 – Vazão mássica de ar  $\times$  temperatura do ar de admissão.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

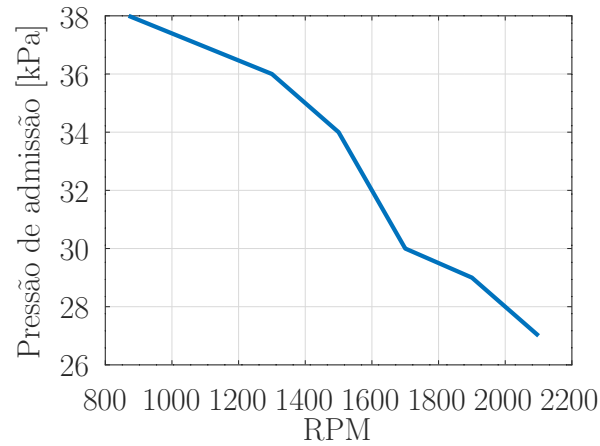
Figura 28 – Vazão mássica de ar  $\times$  pressão do ar de admissão.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Outra variável observada foi a pressão do ar de admissão do motor, que se relaciona de maneira inversa à vazão mássica de ar e a rotação do motor. Isso ocorre, pois, à medida que se aumenta a vazão mássica de ar e a rotação, a pressão diminui (Figs. (29) e (30)).

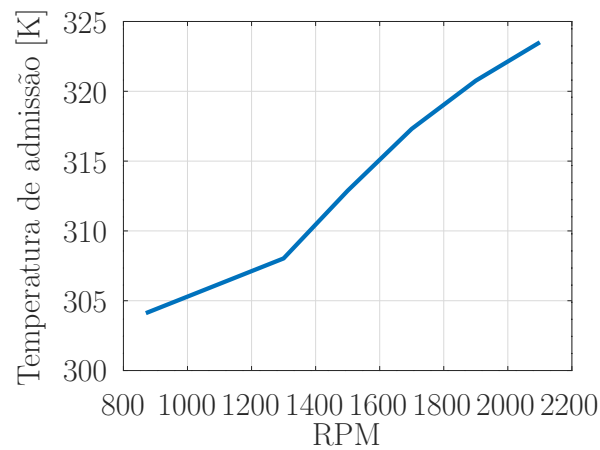
Figura 29 – Pressão de admissão de ar × rotação.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Nos motores de combustão interna alternativos, com “aspiração natural” o ar é admitido através do diferencial de pressão causado pelo cilindro a medida que o pistão desce do PMS para o PMI, no tempo de admissão. Ou seja, a pressão no interior do cilindro é menor do que a ambiente.

Figura 30 – temperatura de admissão de ar × rotação.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

## 5 Considerações Finais

As principais conclusões alcançadas neste trabalho são apresentadas neste capítulo, assim como algumas sugestões de possíveis trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

Pela análise dos resultados obtidos nesse trabalho e de acordo com os objetivos propostos, foi possível medir e coletar os dados de temperatura utilizando a plataforma *Arduino*. Observou-se que essas temperaturas variaram de acordo com o funcionamento do motor e dentro da faixa de temperatura especificada para cada ponto de operação. Os dados da sonda lambda foram medidos e coletados também, e observou-se que esses se mantiveram próximos à faixa de operação estequiométrica para essa condição de trabalho. As medições de vazão mássica de ar foram relacionadas com os parâmetros de rotação, temperatura e pressão de admissão demonstrando o funcionamento real do motor. Portanto, a plataforma *Arduino* mostrou ter um grande potencial para ser usada na instrumentação de motores, tendo um baixo custo, quando comparado com outros sistemas de aquisição de dados.

### 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Analisando este trabalho, é possível definir alguns tópicos de pesquisa futuras para melhorar os resultados atuais e também explorar novas aplicações:

- Fazer os cálculos das incertezas dos dados coletados, como também a validação das equações usadas na programação;
- Desenvolver dispositivo para salvar os dados coletados no cartão de memória, e assim permitir que o motor funcione por um tempo maior e guarde a informação do maior número de variáveis.
- Utilizar outros combustíveis, tais como o etanol e a biogásolina e comparar os resultados obtidos com três tipos de combustíveis.

## REFERÊNCIAS

- AL-BUSAIDI, A. M. Development of an educational environment for online control of a biped robot using matlab and arduino. In: IEEE. **2012 9th France-Japan & 7th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS)/13th Int'l Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM)**. [S.l.], 2012. p. 337–344.
- ALONSO, G. C. M. B. et al. **Simulador de ambiente automotivo para injeções eletrônicas**. [S.l.]: Dissertação submetida à faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- BARRETO, E. J. F.; RENDEIROS, G.; NOGUEIRA, M. Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a amazônia. **LPT, MME**, 2008.
- BERNARDO, G. F. **Método para instalação robusta do sensor medidor de vazão mássica de ar (MAFS) em sistemas de admissão de ar para motores de combustão interna**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010.
- BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. [S.l.]: Edgard Blucher, 2005.
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. [S.l.]: Blucher, 2012. v. 1.
- BUENO, A. V.; VELÁSQUEZ, J. A.; MILANEZ, L. F. A new engine indicating measurement procedure for combustion heat release analysis. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 29, n. 8-9, p. 1657–1675, 2009.
- CÂMARA, J. C. C. **Monitoramento eletrônico da mistura ar/combustível em motores de combustão interna ciclo Otto**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Bahia, 2006.
- CIAMPA, P. F. **Projeto e desenvolvimento de um sensor MAP de pressão e temperatura em LTCC para aplicações automotivas**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.
- COSTA, P. G. Bíblia do carro. **Oficina e Cia**, 2002.
- DEBNATH, B. K.; SAHA, U. K.; SAHOO, N. Theoretical route toward the estimation of second law potential of an emulsified palm biodiesel run diesel engine. **Journal of Energy Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 140, n. 3, p. A4014007, 2013.
- EVANS, M.; NOBLE, J.; HOCHENBAUM, J. **Arduino em ação**. [S.l.]: Novatec Editora, 2013.
- FALCADE, A. C. et al. Análise do consumo de oxigênio, da frequência cardíaca e equivalente metabólico obtidos através de um videogame ativo. **ANÁLISE**, v. 5, n. 6, 2013.

FONSECA, E. G. da; ALEXANDRE, S. Tutorial sobre introdução a projetos utilizando o kit de desenvolvimento arduino. **XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, 2011.

GAO, Z. et al. The interdependency between the maximal pressure and ion current in a spark-ignition engine. **International Journal of Engine Research**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 14, n. 4, p. 320–332, 2013.

GIAKOUMIS, E. G. et al. Exhaust emissions with ethanol or n-butanol diesel fuel blends during transient operation: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 17, p. 170–190, 2013.

GUPTA, H. N. **Fundamentals of internal combustion engines**. [S.l.]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.

GUZZELLA, L.; ONDER, C. **Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.

HEISLER, H. **Advanced vehicle technology**. [S.l.]: Elsevier, 2002.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. [S.l.]: Mcgraw-hill, 1988.

ISMAIL, K. A. R.; GONÇALVES, M. M.; BENEVENUTO, F. J. **Instrumentação básica para engenharia**. [S.l.]: Editora Grafica Imagem, 1998.

JÚNIOR, D. C. **DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MONITORAMENTO DE OPERAÇÕES AGRÍCOLAS COM TRATORES**. Tese (Doutorado) — Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, 2017.

LABECKAS, G.; SLAVINSKAS, S.; MAŽEIKI, M. The effect of ethanol–diesel–biodiesel blends on combustion, performance and emissions of a direct injection diesel engine. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 79, p. 698–720, 2014.

LANGNESS, C.; MANGUS, M.; DEPCIK, C. **Construction, instrumentation, and implementation of a low cost, single-cylinder compression ignition engine test cell**. [S.l.], 2014.

LEE, J.-H. Review on zirconia air-fuel ratio sensors for automotive applications. **Journal of Materials Science**, Springer, v. 38, n. 21, p. 4247–4257, 2003.

LEVENDIS, Y. A.; PANAGIOTOU, T.; TASILM, M. E. **Development of a self-cleaning particle trap for diesel engine particulate control**. [S.l.], 1990.

LIMA, R. G. **Evolução dos motores a combustão interna ciclo Otto no Brasil**. 2017. Trabalho de conclusão de curso – FATEC Santo André. Curso Tecnologia em Mecânica Automobilística.

MAMALA, J.; BROL, S.; GRABA, G. Hardware-in-the-loop type simulator of spark ignition engine control unit. In: IEEE. **2013 International Symposium on Electrodynamics and Mechatronic Systems (SELM)**. [S.l.], 2013. p. 41–42.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. [S.l.]: Publindústria, 2006.

MCROBERTS, M. Arduino básico. **Novatec Editora**, 2<sup>a</sup>ed, 2015.

MERT, A. et al. Design and development of a computer controlled marine diesel engine facility for maritime engineering research and training. **International Maritime Lecturers Association Conference**, 2009.

MOZURKEWICH, M.; BERRY, R. S. Optimal paths for thermodynamic systems: the ideal otto cycle. **Journal of Applied Physics**, AIP, v. 53, n. 1, p. 34–42, 1982.

PETRESCU, F. I.; PETRESCU, R. V. Otto motor dynamics. **GEINTEC**, ISSN, p. 2237–0722, 2016.

PUJATTI, F. J. P. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE GERENCIAMENTO ELETRÔNICO PARA MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

PULKRABEK, W. W. **Engineering fundamentals of the internal combustion engine**. [S.l.]: Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2014.

RAKOPOULOS, D. C. et al. Comparative evaluation of two straight vegetable oils and their methyl ester biodiesels as fuel extenders in hddi diesel engines: Performance and emissions. **Journal of Energy Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 140, n. 3, p. A4014001, 2013.

RIBBENS, W. **Understanding automotive electronics: an engineering perspective**. [S.l.]: Butterworth-heinemann, 2017.

STEVAN, S. L.; SILVA, R. A. **Automação e instrumentação industrial com Arduino: teoria e projetos**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2015.

TILLMANN, C. d. C. Motores de combustão interna e seus sistemas. **Pelotas: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia**, p. 9–25, 2013.

VERMA, R. et al. **A monolithic integrated solution for map applications**. [S.l.], 1997.

WEPPNER, W. Solid-state electrochemical gas sensors. **Sensors and Actuators**, Elsevier, v. 12, n. 2, p. 107–119, 1987.