



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO –
UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



JOÃO PEDRO GURGEL SAMPAIO

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO
INTERNA UTILIZANDO BIO-ÓLEO DE PIRÓLISE, DIESEL E SUAS
MISTURAS COMO COMBUSTÍVEL**

**OURO PRETO - MG
2018**

JOÃO PEDRO GURGEL SAMPAIO

joaopedro@ad.adv.br

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO
INTERNA UTILIZANDO BIO-ÓLEO DE PIRÓLISE, DIESEL E SUAS
MISTURAS COMO COMBUSTÍVEL**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professor orientador: DSc. Elisangela Martins Leal

**OURO PRETO – MG
2018**

FICHA CATALOGRÁFICA

S192a

Sampaio, João Pedro Gurgel.

Análise de desempenho de um motor de combustão interna utilizando bioóleo de pirólise, diesel e suas misturas como combustível [manuscrito] / João Pedro Gurgel Sampaio. - 2018.

viii, 58f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Elisângela Martins Leal.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Motor de Combustão Interna. 2. Diesel. 3. Pirólise. 4. Bio-óleo. 5. Eficiência. I. Leal, Elisângela Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621

Catálogo: ficha.sisbin@ufop.edu.br



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Aos 6 dias do mês de dezembro de 2018, às 9h00min, no Auditório da Fundação Gorceix, localizada na Escola de Minas, Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto, foi realizada a defesa de Monografia do aluno João Pedro Gurgel Sampaio, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. DSc. Luis Antonio Bortolaia, Prof. MSc. Caio César de Souza Pereira e Profa. DSc. Elisângela Martins Leal. O candidato apresentou o trabalho intitulado: **“Análise de desempenho de um motor de combustão interna utilizando bio-óleo de pirólise, diesel e suas misturas como combustível”**, sob orientação da Profa. DSc. Elisângela Martins Leal. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o aluno aprovado.

Ouro Preto, 6 de dezembro de 2018.

Elisângela Martins Leal

Profa. DSc. Elisângela Martins Leal

Professora Orientadora

Luis Antonio Bortolaia

Prof. DSc. Luis Antonio Bortolaia

Professor Avaliador

Caio César de Souza Pereira

Prof. MSc. Caio César de Souza Pereira

Professor Avaliador

João Pedro Gurgel Sampaio

João Pedro Gurgel Sampaio

Aluno

A meus pais, Alexandre e Marilene, a
minha irmã, Júlia, e a Jéssica por todo o
apoio, dedico mais essa etapa vencida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por possibilitarem a conclusão de mais uma etapa, me apoiando e confiando no meu potencial durante todos esses anos. À minha irmã, avós, tios e primos por toda força nessa empreitada. Agradeço também à Jéssica por estar do meu lado em grande parte do curso e da conclusão desse trabalho.

Agradeço aos meus amigos de colégio e da vida, por toda ajuda e companheirismo, necessários para eu chegar onde cheguei. Agradeço também ao Clube do Arcoíro pelas ajudas durante os “breakstorms”.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Mecânica, em especial a Professora Elisângela, por me ensinar, ajudar e estimular meu conhecimento no desenvolvimento desse trabalho.

“É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se a derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que nem gozam muito e nem sofrem muito, porque vivem nessa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota.

Theodore Roosevelt

RESUMO

SAMPAIO, João Pedro Gurgel. Análise de desempenho de um motor de combustão interna utilizando bio-óleo de pirólise, diesel e suas misturas como combustível. Trabalho de conclusão de curso. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Ouro Preto. 2018.

Os combustíveis mais utilizados em motores de combustão interna são a gasolina, o óleo diesel e o gás natural, que são derivados do petróleo; e o etanol e óleos vegetais, que são de origem vegetal. Uma alternativa é a utilização de óleo proveniente do processo de pirólise de biomassa (bio-óleo) como combustível. Neste cenário, este projeto de pesquisa tem por objetivo de analisar o desempenho (consumo e poluentes) de um motor de combustão interna (MCI) utilizando uma mistura de óleo diesel e bio-óleo oriundo do processo de pirólise do *Eucalypto Citriodora*. Assim, neste trabalho pretende-se avaliar a influência do bio-óleo no processo de combustão do motor, analisando o consumo de combustível no motor. O bio-óleo foi misturado ao Diesel nas proporções de 5-95%, 10-90% e 15-85%, e comparado ao Diesel puro. Primeiramente foram realizados estudos teóricos em um motor, obtendo-se valores de 1,25 litros/hora com o Diesel puro, tendo um aumento de 3,2% para a mistura de 15% de bio-óleo. Os dados obtidos de temperatura de chama adiabática apontam que quanto maior a quantidade de bio-óleo, menor a temperatura de chama. Na análise experimental, foi estabelecida a duração de uma hora para cada teste e foram coletados os dados de vazão do combustível e os gases da queima para análise em um Aparelho de Orsat. Os testes utilizando Diesel puro ocorreram e apresentaram um consumo do combustível de 1,044 litros/hora. Os testes utilizando o bio-óleo foram interrompidos após 30 minutos devido ao entupimento do sistema de injeção. Nos 30 minutos, a vazão média do bio-óleo foi menor em 3,2% para a mistura de 5% de bio-óleo. Os resultados obtidos nesse trabalho foram satisfatórios, principalmente para pesquisas de combustíveis alternativos e fontes renováveis de energia com redução da poluição.

Palavras-chave: Motor de Combustão Interna, Diesel, Pirólise, Bio-óleo, Eficiência, Energia, Meio Ambiente.

ABSTRACT

SAMPAIO, João Pedro Gurgel. Performance analysis of an internal combustion engine using pyrolysis bio-oil, diesel fuel and their mixtures. Bachelor degree in Mechanical Engineering. Federal University of Ouro Preto. 2018

*The most commonly used fuels in internal combustion engines are gasoline, diesel oil and natural gas, which are derived from petroleum; and ethanol and vegetable oils, which are of vegetable origin. An alternative is the use of oil from the process of pyrolysis of biomass (bio-oil) as the fuel. In this scenario, this research project aims to analyze the performance (consumption and pollutants) of an internal combustion engine (MCI) using a mixture of diesel oil and bio-oil from the pyrolysis process of *Eucalyptus Citriodora*. Thus, this work intends to evaluate the influence of the bio-oil in the process of combustion of the engine, analyzing the fuel consumption in the engine. The bio-oil was blended to Diesel in the proportions of 5-95%, 10-90% and 15-85%, and compared to pure Diesel. Firstly, theoretical studies were performed on an engine, obtaining values of 1.25 liters/hour with pure Diesel, having a 3.2% increase for the 15% bio-oil mixture. The data obtained from adiabatic flame temperature indicate that the higher the amount of bio-oil, the lower the adiabatic flame temperature. In the experimental analysis, the duration of one hour was established for each test and the fuel flow and flue gas data were collected for analysis in an Orsat Apparatus. Tests using pure Diesel occurred and had a fuel consumption of 1.044 liters/hour. Tests using the bio-oil were stopped after 30 minutes due to the clogging of the injection system. In the 30 minutes, the average bio-oil flow was lower by 3.2% for the 5% bio-oil blend. The results obtained in this work were satisfactory, mainly for research on alternative fuels and renewable energy sources with reduction of pollution.*

Keywords: *Internal Combustion Engine, Diesel, Pyrolysis, Bio-oil, Efficiency, Energy, Environment*

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Calor [kW]
Q_h	Calor fornecido [kW]
Q_c	Calor dissipado [kW]
Q_{4-1}	Calor cedido ao meio [kW]
Q_1	Calor de entrada na admissão [kW]
C_p	Calor específico a pressão constante [kJ/kg °C]
C_v	Calor específico a volume constante [kJ/kg °C]
Q_{2-3}	Calor fornecido durante a compressão [kW]
U_{final}	Energia interna final [kJ/kg]
$U_{inicial}$	Energia interna inicial [kJ/kg]
Q_u	Calor útil [kW]
k	Constante isentrópica [-]
R	Constante universal dos gases [8,314 kJ/kmol.K]
ΔT	Diferença de temperatura [K]
η_t	Eficiência do Ciclo [%]
U_2	Energia interna de compressão [kJ/kg]
U_3	Energia interna de exaustão [kJ/kg]
f	Fração residual de gases [-]
m	Massa [kg]
m_{ar}	Massa do ar [kg]
m_{comb}	Massa do combustível [kg]
m_{res}	Massa residual [kg]
m_{tot}	Massa total [kg]
N_c	Potência do ciclo [kW]
p	Pressão [kPa]
p_1	Pressão de admissão [kPa]
p_2	Pressão de compressão [kPa]
N	Rotação do motor [rpm]
V_r	Relação de compressão [-]
T_c	Temperatura da fonte fria [K]
T_h	Temperatura da fonte quente [K]
T	Temperatura [K]
T_1	Temperatura de admissão [K]

T_2	Temperatura de compressão [K]
T_3	Temperatura na exaustão [K]
T_4	Temperatura no escape [K]
W	Trabalho [J]
W_{comp}	Trabalho de compressão [J]
W_{exp}	Trabalho de expansão [J]
W_c	Trabalho do ciclo [J]
ΔU	Variação da energia interna [J/kg]
Δu	Variação da energia interna específica [J/kg]
ΔH	Variação da entalpia [kJ/kmol]
V	Volume [m^3]
v	Volume específico [m^3/kg]
v_1	Volume específico de admissão [m^3/kg]
v_2	Volume específico após o processo de compressão [m^3/kg]
V_1	Volume no ponto morto inferior [m^3]
V_2	Volume no ponto morto superior [m^3]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento da frota de veículos no Brasil	4
Figura 2 - Energia química nas reações de combustão.....	7
Figura 3 - Demanda elétrica por região	7
Figura 4 – Mudança da demanda de energia primária por combustível no Mundo	8
Figura 5 - Oferta interna de energia elétrica por fonte	8
Figura 6 - Consumo final por fonte	9
Figura 7 - Tempos do motor de ciclo Diesel - a) admissão, b) compressão.....	12
Figura 8 - Tempos de um motor ciclo Diesel - a) explosão/expansão b) escape	13
Figura 9 - Diagramas Pressão <i>versus</i> volume e Temperatura <i>versus</i> entropia (s) do Ciclo Diesel	14
Figura 10 - Motogerador Nagano ND3200M.....	29
Figura 11 - Modelo utilizados na análise experimental.....	30
Figura 12 - Medidor de Vazão.....	31
Figura 13 - Tanque com Resistência Elétrica.....	31
Figura 14 - Misturador Mecânico.....	32
Figura 15 - Ampola de Coleta de Gases	33
Figura 16 - Aparelho de Orsat	33
Figura 17 - Consumo de combustível do motor	40
Figura 18 – Resultados de Temperatura de Chama Adiabática.....	44
Figura 19 - Mistura Diesel e Bio-óleo, com precipitação de Bio-óleo.....	48
Figura 20 - Consumo de Combustível com Diesel.....	50
Figura 21 - Consumo de combustível com 5% de Bio-óleo.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do Diesel Comercial.....	15
Tabela 2 - Comparativo entre processos de pirólise convencional e com aquecimento por micro-ondas.....	18
Tabela 3 - Comparativo do rendimento de bio-óleo entre processos de pirólise convencional e com aquecimento por micro-ondas.....	19
Tabela 4 - Comparação das propriedades do bio-óleo com as propriedades do Diesel e do óleo pesado.....	19
Tabela 5 - Especificações do motor.....	29
Tabela 6 - Variáveis e Indicadores	34
Tabela 7 - Condições de Operação Teóricas Ideais do Motor com óleo diesel.....	37
Tabela 8 - Desempenho do Motor Teórico Ideal.....	37
Tabela 9 - Poder Calorífico Inferior das Misturas de Combustível.....	38
Tabela 10 – Condições Teóricas de Operação do Motor Operando com mistura Diesel-Bio-óleo	39
Tabela 11 - Temperatura de Chama	43
Tabela 12 - Concentração Teórica de Poluentes por kg de combustível.....	45
Tabela 13 - Composição do Bio-óleo	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema.....	1
1.2	Justificativa.....	3
1.3	Objetivos.....	4
1.3.1	Geral	4
1.3.2	Específicos.....	5
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Energia.....	6
2.2	Motor de combustão interna.....	9
2.3	Óleo Diesel	14
2.4	Bio-óleo de pirólise	17
2.5	Análise de desempenho	20
2.6	Considerações finais	25
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	Tipo de Pesquisa.....	26
3.2	Materiais e Métodos	27
3.2.1	Materiais e métodos para a análise experimental	28
3.3	Variáveis e Indicadores	34
3.4	Instrumento de Coleta de Dados.....	34
3.5	Tabulação dos Dados.....	35
3.6	Considerações Finais do Capítulo	35
4	RESULTADOS.....	36

4.1	Análise Teórica.....	36
4.1.1	Cálculo Teórico da Combustão	41
4.1.2	Comparativo dos Gases de Combustão	45
4.2	Análise Experimental	46
4.3	Considerações Finais	52
5	CONCLUSÃO.....	53
5.1	Conclusões.....	53
5.2	Recomendações para Trabalhos Futuros	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

Este primeiro capítulo tem a finalidade de abordar de maneira teórica os conceitos de energia, motores de combustão interna e seu funcionamento, óleo diesel e bio-óleo proveniente de pirólise como combustíveis. Dessa forma o primeiro capítulo apresentará o problema, os objetivos e a justificativa para a realização desse estudo, além da estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

A energia existe na vida do homem e é utilizada pelo mesmo desde a idade da pedra, quando o fogo foi descoberto, sendo empregado para aquecer seus corpos e cozer alimentos. Com o passar das gerações, outras formas de energia foram descobertas, como a energia potencial dos rios, que possibilitou avanços na agricultura e a aglomeração de povos em comunidades (ELEKTRO, 2012).

Segundo Bucussi *apud* Wilson (2006), energia significa a capacidade de realizar trabalho mecânico e foi proposta primeiramente em 1807 pelo físico Thomas Young. A primeira revolução industrial no final do século XVIII tornou o conceito mais conhecido com a invenção da máquina a vapor, possibilitando um crescimento econômico e social, precedendo a invenção dos automóveis.

Romanzoti (2013) destaca que o primeiro automóvel, na concepção moderna que se tem hoje, foi o Benz Motor Car número 1, concebido por Karl Benz em 1886. Possuía apenas três rodas, mas já trazia conceitos básicos de um veículo automotor. O sistema de propulsão desse veículo foi um dos primeiros motores de combustão interna criados, transmitindo a energia até as rodas por um sistema de engrenagens.

Assim, segundo Tillmann (2013, p.45):

Motor é uma máquina destinada a converter qualquer forma de energia térmica, elétrica, hidráulica, química e outras, em energia mecânica. Os motores de combustão interna realizam a transformação de energia térmica proveniente da combustão ou queima do combustível em energia mecânica.

Ainda de acordo com Tillmann (2013), o primeiro motor de combustão interna apareceu em 1860, criado por Jean Joseph Etienne e sete anos mais tarde Nicolaus Otto e Eugen Langen apresentaram um projeto mais eficiente. Nicolaus Otto apresentou um motor de quatro cilindros em 1876 com eficiência de 14% e características básicas de funcionamento que seguem até hoje.

Martins (2006) destaca que Rudolf Diesel em 1892 registrou a patente do motor que possuía a ignição por compressão (diferente do conceito apresentado por Otto, de ignição por centelha elétrica), que leva seu nome até hoje. A combustão neste motor se faz pelo aumento da temperatura provocado pela compressão do ar. O primeiro protótipo de motor diesel foi alimentado com óleo vegetal, porém o combustível utilizado desde então por esses motores é o óleo diesel.

O óleo diesel é um combustível fóssil, proveniente do petróleo, e segundo Santos (2016), a queima desse combustível gera poluição atmosférica principalmente em grandes centros, onde a aglomeração de veículos é maior. Ainda de acordo com Santos (2016), os poluentes podem ser classificados em primários, oriundos das descargas dos carros, e secundários, pois sofrem transformações na atmosfera.

Estabelecer relação direta entre determinado poluente e os efeitos que ele provoca no meio ambiente não é fácil, considerando sua dispersão no ar, a distância que sua concentração alcança e o seu tempo de exposição. Dessa forma, a poluição atmosférica pode causar impactos locais, regionais e globais (SANTOS *apud* MOTA, 2016).

O óleo diesel é composto por hidrocarbonetos, oxigênio, nitrogênio e enxofre, e é mais comumente utilizado em veículos de grande porte, como caminhões, ônibus, grandes embarcações e grandes geradores (BORSATO *et al.*, 2009). Sua produção não é barata, e mesmo com a exploração da reserva no pré-sal, a busca por substitutos mais econômicos e sustentáveis é uma realidade (FERREIRA, 2014). Um substituto mais ecológico é o bio-óleo proveniente do processo de pirólise, já que o processo tem alta eficiência de transformação, baixo investimento e proporciona produtos diretamente na forma líquida (FERREIRA *apud* ROCHA, 2014).

Esses produtos de pirólise possuem grande potencial para substituir os combustíveis fósseis, mas como destacado por Ferreira (2014), são altamente oxigenados, possuem teor de água elevado, alta acidez e outras características prejudiciais ao processo de combustão e aos componentes do motor, portanto devem receber uma atenção maior quanto ao seu uso.

A pirólise é um processo térmico que visa converter uma amostra em outras substâncias pelo aquecimento com ausência de oxigênio. Tem sido muito utilizada para transformar biomassa em gases, óleos e sólidos com características de combustíveis (FERREIRA *apud* TSAI, 2014). Ela consiste na decomposição química da biomassa, onde o calor irá quebrar as moléculas, deixando-a fracionada em compostos de carbono, os quais podem ser utilizados como combustíveis (FERREIRA *apud* DINIZ, 2014).

Para avaliar o rendimento e o desempenho do bio-óleo, é necessária uma análise de dados de um motor funcionando com os dois combustíveis. Segundo Ferreira e da Costa (2010), esses testes devem ser feitos em um sistema motogerador ou em dinamômetro, e possuir um sistema de coletas de dados e para coleta dos gases de escape. Esse conjunto informará torque, potência e eficiência fornecida por cada combustível.

De acordo com o contexto, tem-se a seguinte problemática:

Qual a influência do uso de bio-óleo de pirólise no desempenho de um motor de combustão interna ciclo Diesel?

1.2 Justificativa

Hodiernamente, a busca por fontes renováveis de energia está se tornando prioridade ao redor do mundo. A principal fonte motora para o transporte, de pessoas e de carga, são os motores de combustão interna, e em sua grande maioria, é utilizado combustíveis fósseis como fonte de energia. Mas os combustíveis fósseis, provenientes do petróleo, possuem dois pontos primordiais que justificam essa busca por novas fontes renováveis de energia.

Um desses pontos é a quantidade limitada de petróleo no mundo. De acordo com a revista Mundo Estranho (2011), se for levada em conta as reservas de petróleo já conhecidas e com possibilidade de extração do óleo no mundo, a exploração secará todas as reservas em aproximadamente quarenta anos.

Outra questão que corrobora com esses dados é o grande aumento da frota de veículos no mundo. Segundo o jornal O Globo (2013), a frota de veículos cresceu em demasia nos últimos anos no Brasil, como é possível analisar na Figura 1.

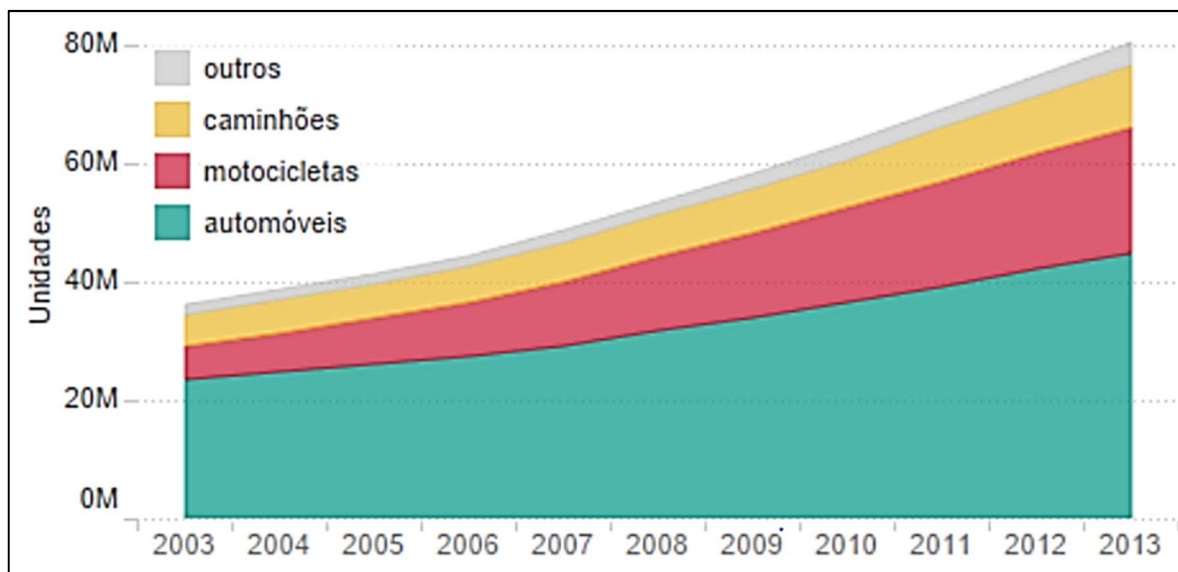


Figura 1 - Crescimento da frota de veículos no Brasil
Fonte: DENATRAN (2013)

Na Figura 1 é possível perceber que a frota de veículos automotores duplicou entre os anos de 2003 e 2013, alcançando o valor de oitenta milhões de veículos em circulação, o que equivale a aproximadamente um veículo para cada dois habitantes no Brasil.

O outro ponto é a poluição causada por veículos como esses. De acordo com o jornal O Progresso (2011), com o grande crescimento da frota veicular do Brasil na última década, seria necessário uma área florestal com onze vezes a área da mata atlântica para poder neutralizar o CO₂ produzido por esses veículos.

Sendo assim, o uso de bio-óleo, proveniente de biomassa vegetal, pode ser vantajoso, já que é produzido a partir da biomassa de eucalipto. O eucalipto além de ser uma fonte renovável, também neutraliza, enquanto plantado, parte das emissões de CO₂ emitidas pela queima do bio-óleo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar o desempenho de um motor de combustão interna, ciclo Diesel, utilizando um produto de pirólise de micro-ondas, o bio-óleo.

1.3.2 Específicos

- Realizar estudo teórico acerca de motor de combustão interna e análise de desempenho, pirólise por micro-ondas, bio-óleo (biomassa) e seus impactos ambientais;
- Descrever a metodologia adotada, apontar as variáveis e indicadores, apresentar a instrumentação de coleta de dados e tabulação de dados obtidos;
- Realizar estudo experimental com o bio-óleo e motor de combustão interna, buscando principalmente o consumo do motor de acordo com a respectiva mistura de combustível adotada;
- Recomendar trabalhos futuros de acordo com o observado no presente estudo.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho será dividido em cinco capítulos e estão organizados da seguinte forma:

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e os objetivos geral e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito do funcionamento de um motor de combustão interna, de sua análise de desempenho, do processo de pirólise por micro-ondas e seu produto, o bio-óleo. Também é apresentada uma revisão sobre o meio ambiente e os impactos causados pelos combustíveis fósseis e biocombustíveis.

O terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas utilizadas para a coleta de dados que são partes essenciais na obtenção dos resultados.

No quarto capítulo são relatadas as discussões e resultados encontrados a partir da coleta de dados.

O quinto capítulo encerra o trabalho com as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste segundo capítulo será apresentada uma abordagem histórica e teórica sobre energia, motores de combustão interna, meio ambiente e o impacto causado pela queima de combustíveis, óleo Diesel, o processo de pirólise e seu produto o bio-óleo e sobre análise de eficiência. Sendo assim, a finalidade do segundo capítulo está vinculada no embasamento teórico para todo o trabalho.

2.1 Energia

De acordo com Viana *et al.* (2012), a energia está presente no dia-a-dia da população mundial, desde aplicações básicas e naturais, como o queimar do gás no fogão ou o movimentar de um músculo, até às novas tecnologias, como supercomputadores e veículos automotores. Por causa dessa ampla gama de atuação da energia, seu conceito suporta inúmeros sentidos e definições.

No século IV A.C., como frisa Viana *et al.* (2012), Aristóteles foi um dos pioneiros a tentar conceituar energia, e ele a considerava como uma realidade em movimento. De maneira usual, é muito comum encontrar livros afirmando que energia é a capacidade de realizar trabalho, embora essa definição não seja completamente correta, já que não se aplica a todos os tipos de energia.

Viana *et al.* (2012) também ressalta que no ano de 1872, o físico inglês James Clerk Maxwell conceituou energia como sendo “aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste a essa mudança”. Assim a energia pode ser vista em tudo que modifica seu estado inicial, desde grandes máquinas até reações entre átomos. As reações químicas, por exemplo, possuem uma extensa aplicação, por conta da energia existente nas moléculas de seus reagentes. Máquinas térmicas, como motores de combustão interna, fornos e caldeiras, utilizam a energia química proveniente de combustíveis para transforma-la em energia térmica (calor), como visto na Figura 2.

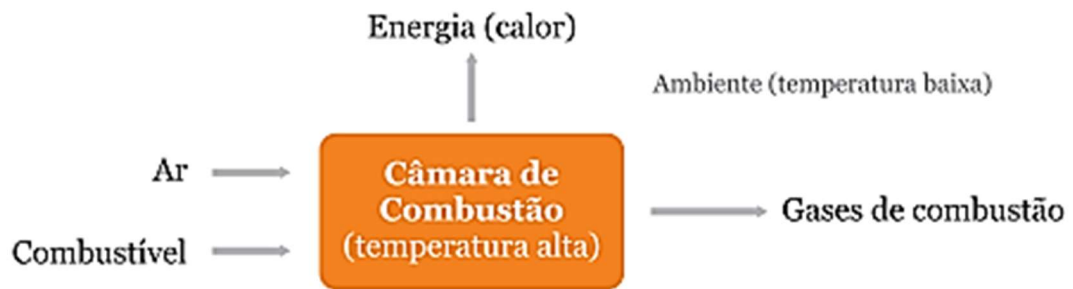


Figura 2 - Energia química nas reações de combustão
Fonte: Viana et al., 2012

Analisando a demanda de energia e a projeção para o futuro, é possível perceber o quão fundamental a mesma se tornou para a sociedade moderna. A Agência Internacional de Energia (IEA, 2017) destaca que o maior uso da energia no mundo hoje é para aquecimento e mobilidade, e esse consumo, em energia elétrica, tenderá a crescer bastante nos próximos 20 anos, como visto na Figura 3. A IEA ainda afirma que, além do grande crescimento de energias renováveis, os combustíveis provenientes do petróleo ainda são a fonte de energia mais utilizada no mundo, como visto na Figura 4.

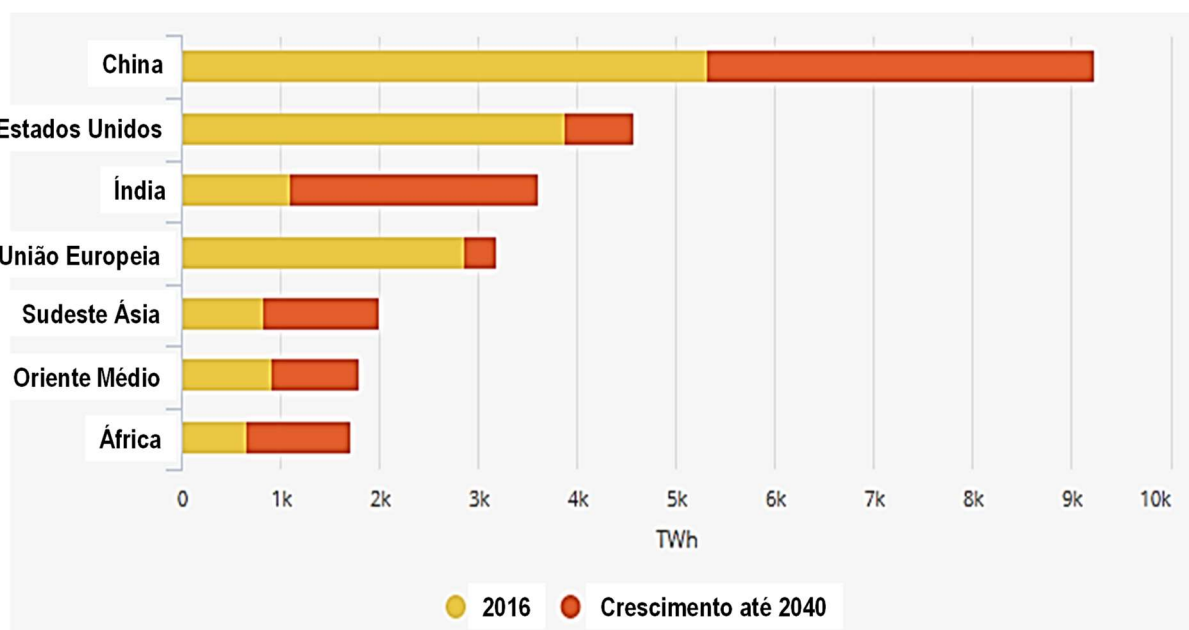


Figura 3 - Demanda elétrica por região
Fonte: Agência Internacional de Energia 2017

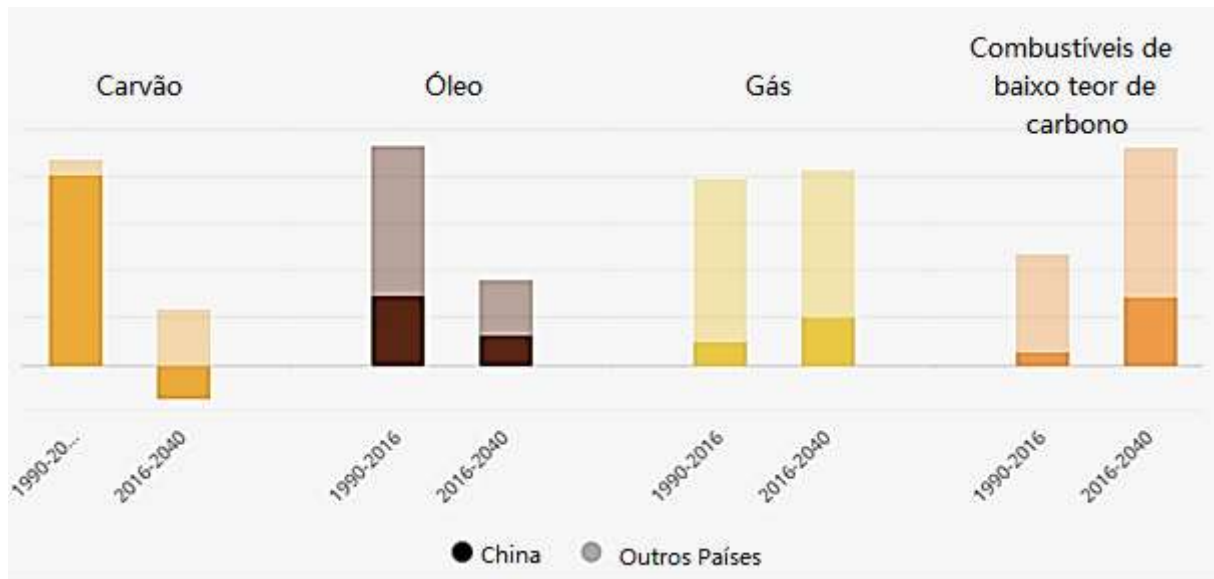


Figura 4 – Mudança da demanda de energia primária por combustível no Mundo
Fonte: Agência Internacional de Energia 2017

Pela Figura 4 também é possível perceber que o atual cenário está mudando, e até a década de 2040, os combustíveis fósseis não serão mais a principal fonte de energia nesse segmento, dando um maior espaço para os combustíveis de baixo teor de carbono e renováveis.

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2017, realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o cenário brasileiro de demanda e produção de energia não segue à risca o que acontece ao redor do mundo, já que por questões naturais, 80,4% de toda energia elétrica do país foi produzida por fontes renováveis, como pode ser analisado na Figura 5. Mas em contrapartida, em relação ao consumo total de energia no país, os combustíveis fósseis tiveram um grande aumento no seu consumo nas últimas quatro décadas, como ilustrado na Figura 6.

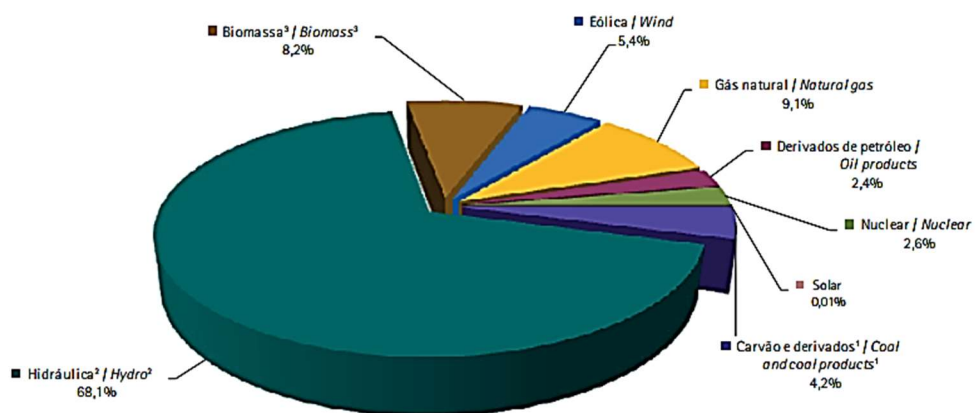


Figura 5 - Oferta interna de energia elétrica por fonte
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2018

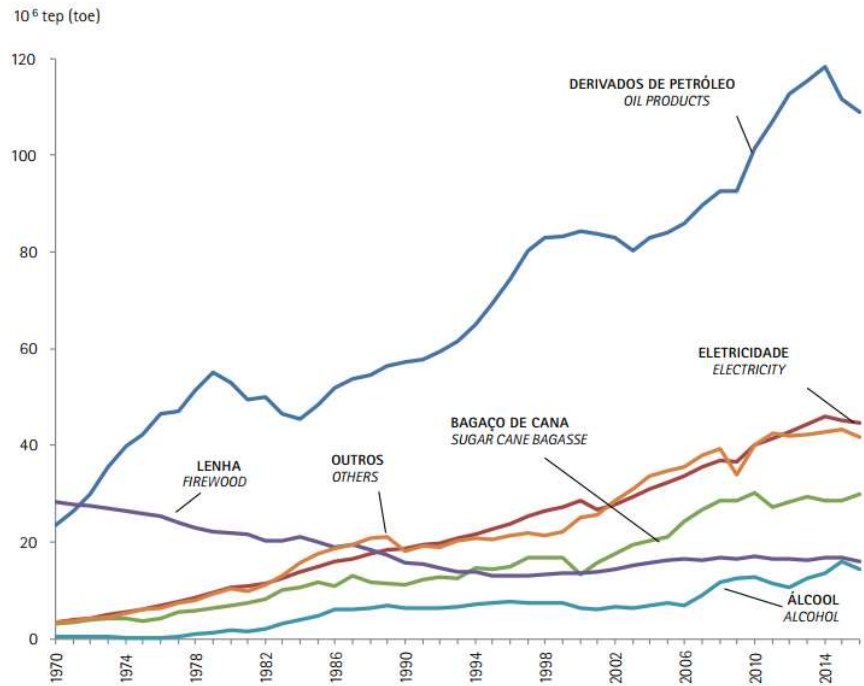


Figura 6 - Consumo final por fonte
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética, 2018

O Balanço Energético Nacional de 2017 (EPE, 2018) também afirma que, no Brasil, estudos e investimentos para obtenção de fontes de energia renováveis é uma realidade. Energias, como a eólica, cresceram em torno de 33% durante o ano de 2016, e junto com a biomassa já compreendem uma parcela de mais de 15% de toda a energia produzida no país. A biomassa consiste na matéria orgânica de origem vegetal ou animal, e contém energia armazenada em forma de energia química.

2.2 Motor de combustão interna

De acordo com Brunetti (2012), uma máquina térmica é um equipamento que permite transformar energia térmica (calor) em trabalho. No caso de um motor de combustão interna, o calor é gerado pela queima do combustível, ou seja, o processo químico de combustão libera energia que será convertida em trabalho pelo motor.

Segundo Martins (2006), o princípio do motor de combustão interna pode ser observado desde a invenção das armas de fogo, onde a energia térmica da explosão transforma-se em trabalho relativo ao movimento do projétil. Porém os primeiros relatos de tentativas de realizar

trabalho útil utilizando a explosão proveniente de um combustível, data do século XVII. A proposta de Christian Huygens em 1673 era utilizar pólvora para gerar calor e mover um pistão dentro de um cilindro, e o trabalho útil era aproveitado depois com o arrefecimento e queda da pressão dos gases da queima. Em 1508 Leonardo da Vinci já havia proposto um equipamento com conceito parecido.

Martins (2006) ainda destaca que o ajudante de Huygens, Denis Papin, propôs o funcionamento da máquina a vapor, que posteriormente foi melhorada por James Watt e deu início à primeira revolução industrial. No início a máquina a vapor funcionava por depressão como os motores de Leonardo e Huygens, e era a pressão atmosférica que realizava o efeito motor, porém o funcionamento dessas máquinas estava limitado a uma pressão máxima de 1 bar (pressão atmosférica). Watt propôs então utilizar a sobre pressão dos gases da queima para realizar esse efeito motor.

Foi no final do século XIX, com a invenção do ciclo 4 tempos, que o desenvolvimento de motores deu uma alavancada. Nicolaus Otto é tido como o pioneiro dessa técnica que, além de possuir rendimento semelhante às anteriores, necessitava de maquinário menor, era mais suave e apresentava um grande potencial para evolução. Porém, por causa de estudos anteriores, a patente de Otto foi revogada. Entre 1857 e 1860 Degrand Million e Schmidt propuseram a compressão prévia da mistura de combustível e comburente antes da combustão. E em 1862 Beau de Rochas apresentou uma proposta de patente de um ciclo 4 tempos com compressão prévia e combustão a volume constante, onde o motor deveria ter 4 pontos fundamentais (MARTINS, 2006):

- Um cilindro com o máximo de volume e o mínimo de superfície;
- A maior velocidade possível;
- A maior expansão possível;
- A maior pressão possível no início da expansão.

Ainda segundo Martins (2006), a queima do combustível fornece calor (energia térmica) ao fluido motor ou fluido ativo, e é o fluido ativo que irá fornecer trabalho para o sistema mecânico. Pode-se então classificar os motores a combustão de acordo com a qualidade do fluido ativo:

- Motores de combustão externa: o fluido ativo não participa da combustão, e é apenas um meio de transferência da energia.

- Motores de combustão interna: o fluido ativo é geralmente os gases da combustão de ar e combustível.

Dando foco aos motores de combustão interna, pode-se dividi-los em duas categorias de acordo com o fluxo de fluido:

- Máquinas volumétricas: o volume da câmara de combustão é variável e o fluido flui de forma pulsante. Exemplos são os motores alternativos (motor a pistão) e os motores rotativos (motor Wankel).
- Máquinas dinâmicas: o fluido flui de forma contínua e sua energia cinética pode ser utilizada como forma de propulsão. Exemplos são os motores rotativos (turbina a gás) e de reação (motores a jato).

De acordo com Taylor (1985), as máquinas volumétricas, mais precisamente os motores alternativos, podem ser classificados de acordo com sua forma de ignição:

- Motor ciclo Otto ou de ignição por centelha: a mistura de ar-combustível é comprimida dentro dos cilindros e ignizada por uma faísca.
- Motor ciclo Diesel ou de ignição por compressão: o ar é comprimido, atingindo uma temperatura elevada, quando o combustível é injetado dentro do cilindro e a combustão ocorre espontaneamente ao contato do mesmo com o ar comprimido.

Segundo Çengel e Boles (2012), o ciclo Diesel é o ciclo ideal para motores de ignição por compressão. Diferente do ciclo Otto, o ar é comprimido sozinho até uma temperatura acima da de autoignição do combustível, e a combustão ocorre quando o combustível injetado para dentro do cilindro reage com o ar quente. Por causa dessa característica, não há a possibilidade de autoignição antes do momento ideal, permitindo o motor a Diesel trabalhar com relações de compressão mais elevadas, entre 12 e 24, garantindo também, na maioria dos casos, uma eficiência maior em relação ao ciclo Otto.

Çengel e Boles (2012) ainda destaca que o ciclo Diesel foi proposto primeiramente por Rudolph Diesel, nos anos 1890, e consiste num ciclo de quatro tempos, como visto na Figura 7 e Figura 8.

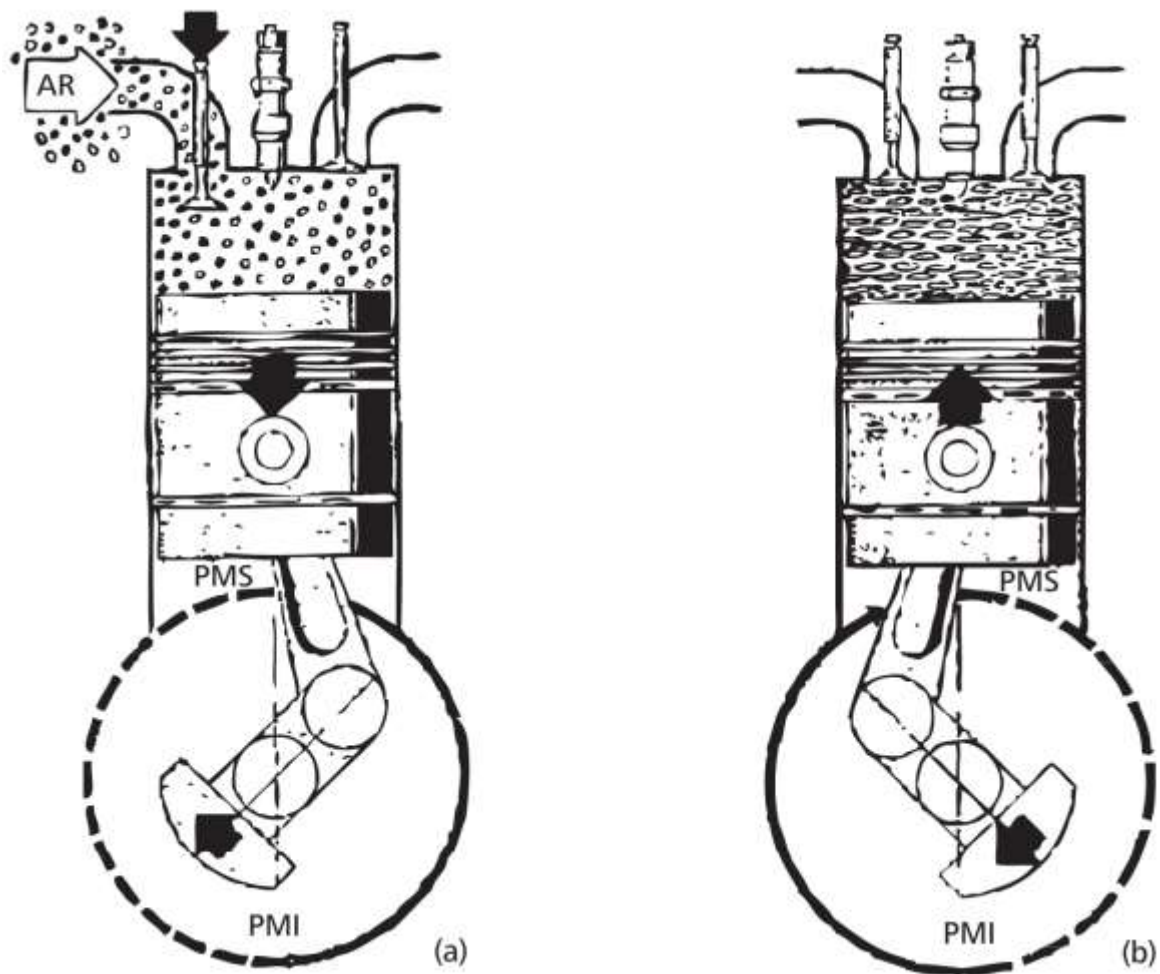


Figura 7 - Tempos do motor de ciclo Diesel - a) admissão, b) compressão
 Fonte: Mercedes Benz do Brasil, 2006

Durante o primeiro tempo, chamado de admissão, o pistão se movimenta do ponto morto superior até o ponto morto inferior, como visto na Figura 7a, admitindo a entrada apenas de ar dentro da câmara de combustão no interior do cilindro. Logo após a etapa de compressão se inicia, onde as válvulas de admissão são fechadas e o pistão desloca até o ponto morto superior novamente comprimindo o ar, como visto na Figura 7b (TILLMANN, 2013). Borges (2007) afirma que, durante a compressão, o ar é comprimido usualmente de 11 a 17 vezes seu volume inicial. Essa relação é chamada de taxa de compressão.

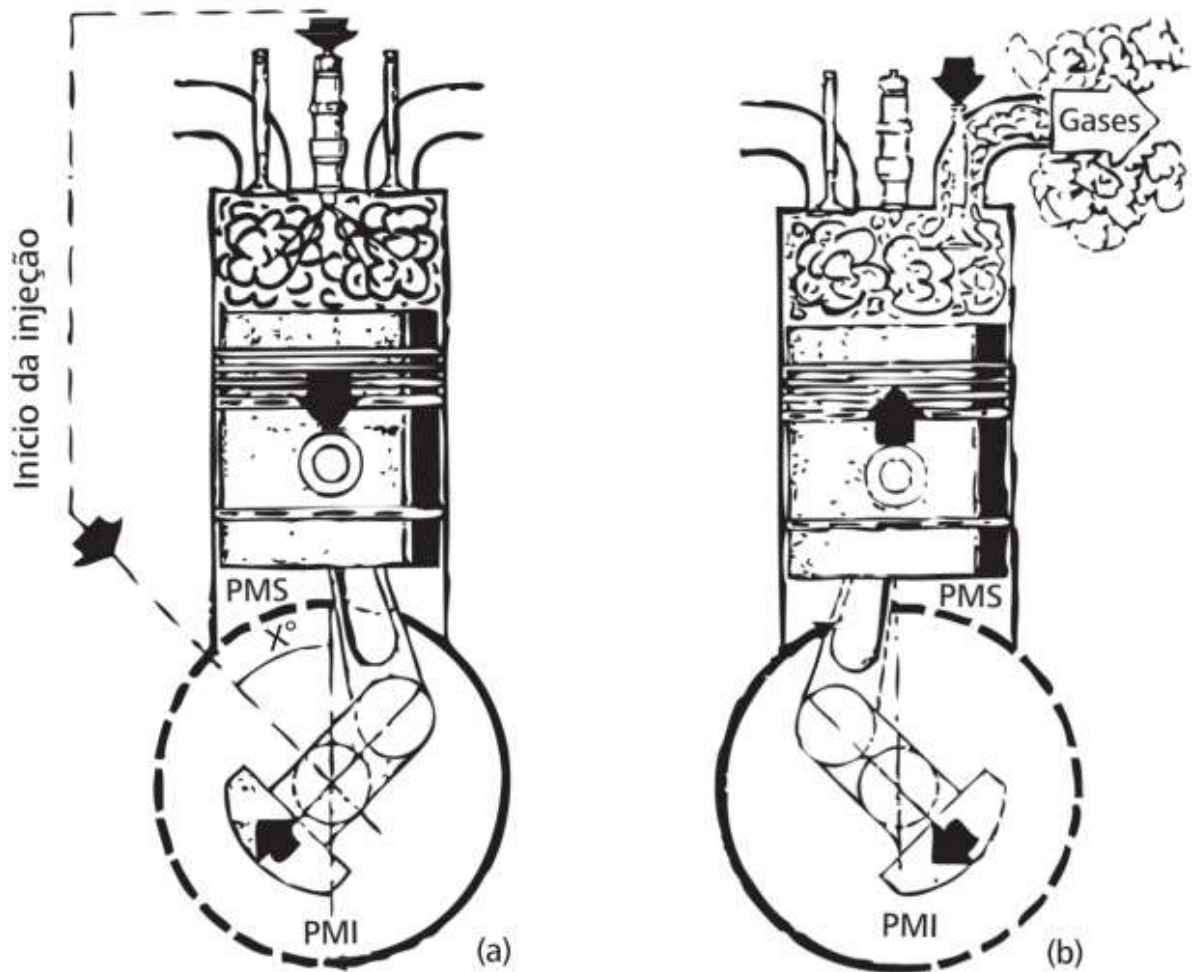


Figura 8 - Tempos de um motor ciclo Diesel - a) explosão/expansão b) escape
 Fonte: Mercedes Benz do Brasil, 2006

Quando o pistão alcança o ponto morto superior novamente, o injetor pulveriza combustível dentro da câmara de combustão, como visto na Figura 8a. Nesse momento o ar comprimido a alta pressão dentro do cilindro está a uma temperatura em torno de 600°C , e o Diesel pulverizado entra em combustão imediatamente, impulsionando o pistão para o ponto morto inferior e produzindo trabalho mecânico. No último tempo o pistão volta a subir até o ponto morto superior, quando a válvula de escape é aberta, liberando os gases de combustão, conforme Figura 8b (TILLMANN, 2013).

Çengel e Boles (2012) salienta que, em virtude de o processo de injeção do combustível no motor Diesel começar quando o pistão se aproxima do ponto morto superior e continuar durante uma parte do processo de expansão, o processo de combustão é mais longo do que nos motores Otto. Portanto o tempo de explosão pode ser aproximado de um fornecimento de calor a pressão constante, conforme visto na Figura 9.

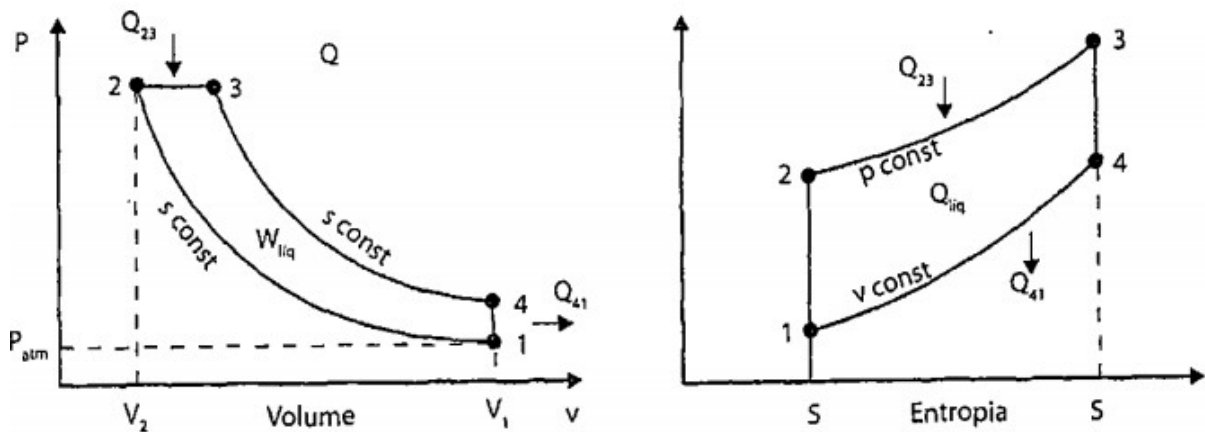


Figura 9 - Diagramas Pressão versus volume e Temperatura versus entropia (s) do Ciclo Diesel
Fonte: Brunetti, 2012

Os diagramas da Figura 9 ilustram o ciclo Diesel, onde os tempos 1-2 e 3-4 são a compressão e a expansão isentrópicas, respectivamente, 2-3 é um processo de absorção de calor a pressão constante e 4-1 é um processo de rejeição de calor a volume constante (ÇENGEL e BOLES, 2012). O tempo 1-2 corresponde ao tempo ilustrado pela figura 7b. O intervalo de tempos que abrange os pontos 2-3 e 3-4 corresponde à figura 8a, e o tempo 4-1 corresponde às figuras 8b e 7a, respeitando a ordem do ciclo já apresentada.

2.3 Óleo Diesel

Bezerra (2007) e Costa (2007) afirmam que o óleo Diesel é um combustível líquido, derivado do petróleo, com consideráveis concentrações de enxofre, que variam de 0,05% a 0,2%, constituído principalmente por uma mistura de hidrocarbonetos com ponto de ebulição entre 200 e 360°C. O óleo Diesel é obtido após as etapas de destilação do petróleo por hidrogenação, síntese e craqueamento catalítico em baixas temperaturas na refinaria de petróleo através da mistura de correntes de querosene, gasóleo, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado.

Segundo Costa (2007), as proporções dos componentes do óleo Diesel permitem enquadrar o produto final dentro das especificações técnicas necessárias para permitir o bom desempenho do produto, minimizando desgaste em motores e mantendo a emissão de poluentes gerados pela queima do produto em níveis aceitáveis.

Costa (2007) observou que a fórmula molecular varia de acordo com o tipo de óleo Diesel e que para a combustão de combustível líquido é conveniente exprimir a composição em termos de um único hidrocarboneto. Van Wylen e Sonntag (1976) *apud* Costa (2007) verificou que o óleo Diesel é considerado como um duodecano ($C_{12}H_{26}$). Ferguson (2001) *apud* Costa (2007) também verificou que outras fórmulas também são usadas para escrever o óleo Diesel como $C_{14,4}H_{24,9}$.

Segundo Heywood (1988) *apud* Costa (2007) o óleo Diesel tem poder calorífico inferior (PCI) médio aproximado de 46.054,8 kJ/kg, sendo que este é o valor do calor liberado durante a combustão completa de um quilograma do mesmo.

Bezerra (2007) e Costa (2007) indicam que o óleo Diesel comercial, embora atenda aos requisitos básicos em termos de características físicas e químicas, requer cuidados de manejo e utilização. Principalmente em relação à água, que deve ser sempre removida, pois a sua presença danifica os componentes de motores como bombas e injetores de combustível. Além da água, todo óleo Diesel tem certa quantidade de enxofre, que não pode ser removido e produz componentes nocivos à saúde, após a combustão. A Tabela 1 apresenta as características do óleo diesel comercial.

Tabela 1 - Características do Diesel Comercial

Características	Diesel comercial
Ponto de névoa (°C)	1
Índice de cetano	45,8
Massa específica à 20°C (g/cm ³)	0,8497
Viscosidade à 37,8°C (cSt)	3,04
Ponto de fulgor (°C)	55
Destilação à 50% (°C)	278
Destilação à 90% (°C)	373
Teor de cinzas (%)	0,014
Teor de enxofre (%)	0,24
Cor (ASTM)	2
Resíduo de carbono Corandson (%)	0,35

Fonte: Ramos *apud* Costa (2007)

De acordo com Varella e Santos (2010) a qualidade do óleo Diesel é especificada em função de diversas características do combustível, tais como: pureza, contagem de partículas, massa específica, viscosidade, número de cetano e ponto de fulgor.

A pureza é uma medida do teor de água e sedimentos presentes no óleo Diesel provenientes do transporte e manuseio inadequado. A água causa corrosão dos injetores, combustão incompleta e promove a formação de partículas oriundas da corrosão. Os sólidos em suspensão produzem danos no sistema de alimentação de combustível (bomba, injetor e tubulação). Já a contagem de partículas é o que detecta e quantifica a presença de contaminantes no óleo Diesel, tanto de origem metálica como não metálica, incluindo sujeiras de fonte externa.

A massa específica é a relação entre a massa e o volume de óleo Diesel a temperatura de 20°C, em g/cm³. Variações na massa específica influenciam na vazão do combustível injetado na câmara de combustão do motor, uma vez que a bomba injetora controla a injeção de combustível através da variação de volume. Os níveis necessários para comercialização são 820-880 kg/m³ para o óleo Diesel tipo B, usado nas regiões metropolitanas do Brasil e 820-865 kg/m³ para o óleo Diesel tipo D, usado para embarcações marítimas (FARIAS e SILVA *apud* PITANGUY, 2014);

A viscosidade do óleo Diesel é determinada em condições cinemáticas e é expressa em centésimos de Stokes (centiStokes). A viscosidade é medida em função da resistência ao escoamento do óleo Diesel em um orifício padrão. A viscosidade influencia a lubrificação da bomba e do injetor no motor. Valores baixos de viscosidade implicam em desgastes excessivos e vazamentos no sistema de alimentação de combustível. Valores elevados de viscosidade aumentam o esforço na bomba injetora para realizar a atomização, produzindo um *spray* inadequado na saída do injetor, trazendo consequências para o desempenho do motor (Varella e Santos, 2010).

O ponto de fulgor indica a facilidade que o óleo Diesel possui em inflamar, ou seja, está relacionado à menor temperatura na qual o combustível libera vapor na quantidade suficiente para formar uma mistura inflamável. O valor do ponto de fulgor depende da quantidade de hidrocarbonetos leves presentes no óleo Diesel (VARELLA E SANTOS, 2010).

2.4 Bio-óleo de pirólise

Segundo Ayres *et al* (2003), o processo de pirólise é uma degradação termoquímica, na ausência de oxigênio, onde uma biomassa será decomposta em produtos característicos com propriedades de combustíveis. Esse processo possui balanço energético positivo, ou seja, produz mais energia do que consome.

Ayres *apud* Pinto (2003) ainda destaca que o processo de pirólise converte a matéria orgânica em três produtos. Esses produtos podem ser divididos em função de suas composições químicas e principalmente seu estado físico:

- Gases: compostos principalmente por hidrogênio, metano e monóxido de carbono;
- Líquidos: compostos principalmente por hidrocarbonetos, álcoois e ácidos orgânicos;
- Sólidos: compostos principalmente por carbono quase puro e materiais inertes em forma de escória.

O combustível líquido produzido pela pirólise, o bio-óleo, é um combustível de alta eficiência como salienta Vieira *apud* Guedes (2014) e ainda é proveniente de uma fonte renovável, sendo a principal vantagem em relação a combustíveis fósseis. O bio-óleo ainda possuem alguns desafios para seu uso, principalmente pela sua composição que possui uma concentração considerável de ácidos orgânicos que interferem na integridade do motor.

De acordo com Ferreira (2014), o processo de pirolise possui diferentes denominações de acordo com as condições utilizadas, o que favorece a produção de diferentes subprodutos:

- Pirólise lenta – caracterizada pela aplicação de baixas temperaturas e longo tempo de residência no reator, favorecendo assim a formação de combustível sólido (carvão vegetal), ou pela aplicação de altas temperaturas e longos tempos de residência no reator, favorecendo assim a produção de combustível gasoso (biogás).
- Pirólise rápida – caracterizada pela aplicação de temperaturas moderadas e curtos tempos de residência no reator, favorecendo assim a produção de combustível líquido (bio-óleo)

O processo de pirólise de biomassa por micro-ondas é uma proposta mais recente e bastante eficiente, apresentando vantagens em relação a processos mais convencionais. Esse processo é caracterizado como pirólise lenta e intermediária, devido aos maiores tempos de residência da biomassa dentro do reator e a quantidade dos produtos obtidos, como afirma Borges *apud* Yagmur (2014).

Borges (2014) afirma que a pirólise por micro-ondas possui um melhor controle dos parâmetros de aquecimento do processo, garantindo um melhor controle das composições químicas dos produtos de pirólise, além de maximizar a produção dos mesmos. A Tabela 2 traz um comparativo do processo de pirólise por micro-ondas em relação a pirólise com aquecimento convencional.

Tabela 2 - Comparativo entre processos de pirólise convencional e com aquecimento por micro-ondas

Processo com aquecimento por micro-ondas		Processo com aquecimento convencional	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Variedade e qualidade de produtos obtidos	Medição de temperatura	Flexibilidade para alimentação de biomassa e produtos	Menor qualidade de produtos (com formação de PAHs e formação de CO ₂)
Ganho energético devido à significativa redução de temperatura (1500 – 300°C)	Economia do aumento de escala do processo (investimento e retorno)	Tecnologia bem desenvolvida e de fácil <i>scale-up</i>	Maior consumo energético devido às maiores temperaturas do processo (400 – 600°C)
Requer menos pré-tratamento para a biomassa alimentada	Não homogeneidade em larga escala Problemas de reprodutibilidade em produtos	Possibilidade de processamento contínuo em larga escala	
Possibilidade de processamento contínuo com múltiplas unidades			

Fonte: Adaptado de Borges, 2014

Ainda segundo Borges (2014), a irradiação do aquecimento por micro-ondas oferece um melhor controle do processo, por causa do aquecimento instantâneo, conseqüentemente, garantindo um melhor controle do tempo de reação, temperatura e potência para a pirólise da biomassa. A produção de bio-óleo também pode ser obtida com um rendimento maior,

conforme a Tabela 3, e sem a formação de produtos tóxicos, oriundos do processo, já que o processo é realizado em atmosfera controlada e com restrição de oxigênio.

Tabela 3 - Comparativo do rendimento de bio-óleo entre processos de pirólise convencional e com aquecimento por micro-ondas

Biomassa	Rendimento de Bio-óleo (% em peso)	
	Processo com aquecimento por micro-ondas	Processo com aquecimento convencional
Óleo Residual	85	46 - 80
Lodo de Esgoto A	10,3	3,1
Lodo de Esgoto B	2,2 – 4,0	0,9

Fonte: Borges (2014)

O bio-óleo, um dos principais produtos da pirólise, é um líquido marrom escuro, com teor de água consideravelmente elevado, e natureza predominantemente polar, o que dificulta sua solubilidade em derivados do petróleo (BORGES *apud* VENDERBOSCH, 2014). O bio-óleo, além de possuir características distintas dos combustíveis fósseis, como visto na Tabela 4, já existe o interesse de estudos por ser um potencial substituto para combustíveis convencionais não renováveis (PÉREZ *et al*, 2007)

Tabela 4 - Comparação das propriedades do bio-óleo com as propriedades do Diesel e do óleo pesado

Propriedades	Unidades	Bio-óleo	Diesel	Óleo Combustível Pesado
Densidade	kg/m ³ a 15°C	1220	854	963
Composição Típica	% C	48,5	86,3	86,1
	% H	6,4	12,8	11,8
	% O	42,5	-	-
	% S	-	0,9	2,1
Viscosidade	cSt a 50°C	13	2,5	3,51
Flash point	°C	66	70	100
Pour point	°C	-27	-20	21
Cinza	% peso	0,13	<0,01	0,03
Água	% peso	20,5	0,1	0,1
PCI	MJ/kg	17,5	42,9	40,7
Acidez	pH	3	-	-

Fonte: Pérez *apud* Bridgwater, 2007.

Analisando a Tabela 4 é possível constatar que o poder calorífico do bio-óleo é aproximadamente a metade se comparado a esses dois derivados do petróleo, mas em compensação não possui teores de enxofre, elemento que pode ser prejudicial ao meio ambiente (PÉREZ *et al*, 2007).

2.5 Análise de desempenho

Brunetti (2012) afirma que o estudo dos ciclos ideais de uma máquina térmica não é algo simples, visto que a composição dos combustíveis varia de forma complexa, além dos próprios processos não seguirem à risca o ciclo ideal. Todavia considera-se as seguintes hipóteses para associar o ciclo ideal ao ciclo real:

- O fluido ativo é ar, considerado gás perfeito;
- Não há admissão nem escape, para que seja possível utilizar a primeira lei da termodinâmica para sistemas;
- São isentrópicos os processos de compressão e expansão;
- A combustão é considerada como fornecimento de calor para a mistura;
- É retirado calor por uma fonte isocórica para que o sistema retorne às condições iniciais;
- Todos os processos são considerados reversíveis.

As considerações acima compõem e caracterizam o ciclo Diesel ideal, já ilustrado na Figura 9 desse mesmo capítulo.

Com isso, pode-se definir o trabalho útil ou trabalho de ciclo (W_{ciclo}) como sendo a diferença entre o trabalho de expansão (W_{exp}) e o trabalho de compressão (W_{comp}), segundo Brunetti (2012):

$$W_c = W_{\text{exp}} - W_{\text{comp}} \quad (1)$$

Para definir o valor do calor útil (Q_u), realiza-se o cálculo da diferença entre o calor fornecido durante a compressão (Q_{2-3}) e o calor cedido ao meio durante a expansão (Q_{4-1}), como

pode ser visto nos diagramas da Figura 9, ilustrada anteriormente, de acordo com (ÇENGEL, 2006):

$$Q_u = Q_{2-3} - Q_{4-1} \quad (2)$$

De acordo com Brunetti (2012), admitindo que não há admissão nem escape de gases e desprezando as variações de energia cinética e potencial, a primeira lei da termodinâmica será dada por:

$$Q - W = U_{Final} - U_{Inicial} \quad (3)$$

A segunda lei da termodinâmica aplicada para motores sugere que é possível a transformação de calor em trabalho, ou seja (BRUNETTI, 2012):

$$U_{Final} = U_{Inicial} \rightarrow Q_u = W_c \rightarrow W_c = Q_{2-3} - Q_{4-1} \quad (4)$$

De acordo com Brunetti (2012), a segunda lei da termodinâmica também afirma que não é possível o total aproveitamento da energia térmica, portanto é necessário conhecer a eficiência térmica do ciclo (η_t), através de:

$$\eta_t = \frac{W}{Q_h} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} \quad (5)$$

Ajustando essa fórmula para o ciclo Diesel tem-se (BRUNETTI, 2012):

$$\eta_t = \frac{W}{Q_{2-3}} = \frac{Q_{2-3} - Q_{4-1}}{Q_{2-3}} = 1 - \frac{Q_{4-1}}{Q_{2-3}} \quad (6)$$

De acordo com Çengel e Boles (2012), a eficiência térmica máxima, de acordo com a termodinâmica, também pode ser obtida pela eficiência térmica do ciclo de Carnot ($\eta_{t \text{ Carnot}}$), onde a mesma é baseada nos processos reversíveis adiabáticos e térmicos, como visto na equação 7.

$$\eta_{t \text{ Carnot}} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \quad (7)$$

De acordo com Brunetti (2012), para ser possível o cálculo da energia interna específica (Δu) do sistema e da variação do calor específico (Δh), é necessário que a mistura ar-combustível seja considerada um gás perfeito. Assim as equações a seguir são válidas para esse sistema.

$$\Delta u = C_v \Delta T \quad (8)$$

$$\Delta U = m C_v \Delta T \quad (9)$$

$$\Delta h = C_p \Delta T \quad (10)$$

$$\Delta H = m C_p \Delta T \quad (11)$$

A equação de Clapeyron também pode ser utilizada, já que a mistura no interior do motor é considerada um gás perfeito. Assim é possível o cálculo de diversas variáveis quando não encontradas pelo ciclo termodinâmico. R_u representa a constante universal dos gases (no S.I. igual a 8,314 kJ/kmol.K), a constante do gás (fluido de trabalho) é a divisão de R_u pelo peso molecular (PM) do fluido de trabalho e denota-se por R ($R = R_u/PM$). Com R é possível calcular a pressão, volume, massa e temperatura.

$$pV = mRT \quad (12)$$

Çengel e Boles (2012) mostra que outros cálculos importantes para trabalhar com um fluido considerado como gás ideal são a constante adiabática (k) e os cálculos de calor específico a volume constante (C_V) e calor específico a pressão constante (C_p).

$$k = \frac{C_p}{C_V} \quad (13)$$

$$R = C_p - C_V \quad (14)$$

$$C_V = \frac{R}{k - 1} \quad (15)$$

$$C_p = \frac{kR}{k - 1} \quad (16)$$

Considerando os processos de compressão e expansão como isentrópicos, ainda se tem as seguintes relações para pressão volume e temperatura (ÇENGEL e BOLES, 2012):

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k \quad (17)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} \quad (18)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (19)$$

De volta à primeira lei, tem-se a seguinte equação.

$$Q_{2-3} - W_{2-3} = U_3 - U_2 \quad (20)$$

Considerando o processo de adição de calor a pressão constante, podemos assumir a equação 21, resultando também na equação 22:

$$W_{23} = \int_2^3 p dV = p(V_3 - V_2) \quad (21)$$

$$Q_{2-3} - p(V_3 - V_2) = U_3 - U_2 = (U_3 + p V_3) - (U_2 + p V_2) \quad (22)$$

Assumindo as definições de entalpia e de gás perfeito, pode-se então chegar às seguintes equações:

$$Q_{2-3} = U_3 - U_2 = mC_p(T_3 - T_2) \quad (23)$$

$$Q_{4-1} = U_4 - U_1 = mC_p(T_4 - T_1) \quad (24)$$

Desta forma, utilizando essas considerações, e levando em conta o ciclo Diesel, obtém-se a seguinte relação para a eficiência térmica do ciclo, substituindo na equação 6.

$$\eta_t = \frac{W_c}{Q_{2-3}} = \frac{Q_{2-3} - Q_{4-1}}{Q_{2-3}} = 1 - \frac{Q_{4-1}}{Q_{2-3}} = 1 - \frac{mC_p(T_4 - T_1)}{mC_p(T_3 - T_2)} \quad (25)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{mC_p(T_4 - T_1)}{mC_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{k} \frac{T_1}{T_2} \left[\frac{\left(\frac{T_4}{T_1}\right) - 1}{\left(\frac{T_3}{T_2}\right) - 1} \right] \quad (26)$$

Utilizando as equações 17, 18 e 19, e substituindo-as na equação 24 com as devidas alterações algébricas, chega-se então à equação de eficiência do ciclo com adição de calor a pressão constante.

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{k} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1} \left[\frac{\left(\frac{T_3}{T_2} \right)^k - 1}{\left(\frac{T_3}{T_2} \right) - 1} \right] \quad (27)$$

Por fim, outro fator importante a ser calculado para a análise de desempenho é a fração residual de gases (f), que segundo Brunetti (2012) é a razão entre a massa dos gases residuais e a massa da mistura dentro do cilindro do motor.

$$f = \frac{m_{res}}{m_{total}} = \frac{m_{res}}{m_{ar} + m_{comb} + m_{res}} \quad (28)$$

2.6 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre energia, motores de combustão interna, meio ambiente e os impactos causados pelos combustíveis fósseis, óleo Diesel, processos de pirólise e seu produto, o bio-óleo, e as definições e cálculos para realizar a análise de desempenho de um motor de combustão interna ciclo Diesel.

Os conceitos e definições abordadas neste capítulo é de suma importância para compreender o funcionamento de motores de combustão interna e como realizar a análise de desempenho. Além disso é possível perceber o impacto ambiental causado por combustíveis fósseis e como fontes renováveis, como o bio-óleo de pirólise, podem ser uma alternativa mais ecológica para esse fim.

No próximo capítulo serão apresentadas as definições quanto ao tipo de pesquisa, apresentando as ferramentas e técnicas utilizadas para a análise de desempenho de um motor de combustão interna utilizando como combustível uma mistura de Diesel e bio-óleo. Também serão apresentados os materiais e métodos para desenvolvimento da pesquisa, apontando a área de atuação da mesma e o meio de coleta de dados do motor de combustão interna utilizado nos testes.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão demonstradas as características do desenvolvimento da pesquisa acerca da análise de desempenho de um motor utilizando uma mistura de óleo Diesel e bio-óleo como combustível em um motor de combustão interna. Será apresentada a natureza da pesquisa, o tipo, as variáveis e indicadores coletados, o instrumento de captação e a tabulação dos dados.

3.1 Tipo de Pesquisa

Gil (1999) afirma que a pesquisa é uma maneira formal e sistemática de desenvolver o método científico, e tem como objetivo principal obter soluções para um problema proposto através de procedimentos científicos.

Segundo Minayo (2003), uma pesquisa pode ser realizada de duas formas, qualitativa e quantitativa. A pesquisa qualitativa é baseada na interpretação, e trabalha com um combinado de significados, motivos, valores, crenças e atitudes, que englobam uma relação mais subjetiva dos processos e fenômenos que não podem ser sintetizados a operações e variáveis e são difíceis de serem descritas numericamente.

Já a pesquisa onde é possível utilizar de métodos estatísticos, dados obtidos em análises, análises numéricas e testes para obter resultados quantificados, é conhecida como pesquisa quantitativa (SILVA, 2004). Segundo Lakatos e Marconi (2006), esse tipo de averiguação é mais indicada quando é possível relacionar o fenômeno estudado com os dados quantificados de maneira objetiva e sistêmica.

De acordo com Gil (1999), o objetivo de uma pesquisa pode ser classificado como exploratório, ou seja, tem a finalidade de esclarecer, desenvolver e modificar conceitos e ideias, utilizando para tal fim a coleta de dados por meio de levantamento bibliográfico, documental e estudos de caso. A pesquisa também pode ser de cunho explicativo, onde fatores que contribuem ou determinam a ocorrência dos fenômenos são identificados com o intuito de explicar esses acontecimentos e incrementar o conhecimento do objeto pesquisado.

Lakatos e Marconi (2006) apontam que a pesquisa bibliográfica é um compilado de dados relevantes ao tema, elaborado a partir de um resumo de outros trabalhos realizados.

Fonseca (2002) afirma que a pesquisa documental é aquela elaborada a partir de várias fontes sem abordagem analítica. Já a pesquisa ação é elaborada a partir de dados empíricos, buscando uma ação ou soluções para um problema. Por fim, a pesquisa experimental, segundo Gil (2002), consiste em determinar um objeto de estudo, definir as formas de controle e observar os efeitos que as variáveis selecionadas para o caso produzem no objeto.

Este trabalho possui uma abordagem de pesquisa de forma quantitativa, pois faz uso de dados numéricos, cálculos e análise estatística. Quanto ao objetivo do trabalho, este consiste em uma pesquisa descritiva e experimental, devido ao fato de que será analisado e observado, tanto em cálculos quanto em testes, o funcionamento de um motor de combustão interna ciclo Diesel utilizando como combustível uma mistura de óleo Diesel e bio-óleo, com o intuito de descrever seu funcionamento, consumo, torque e potência, e emissão de poluentes. Este trabalho também dispõe de uma pesquisa bibliográfica fundamentada em trabalhos já realizados acerca do tema proposto.

3.2 Materiais e Métodos

Foi realizado um estudo bibliográfico com o intuito de auxiliar e nortear a análise de desempenho de um motor a combustão interna funcionando com uma mistura de óleo Diesel e bio-óleo como combustível. Foi descrito o processo de pirólise, do qual é extraído o bio-óleo, assim como as características de ambos os combustíveis, os danos ambientais causados pela queima desses combustíveis e a necessidade de buscar novas fontes de energia renováveis. Por fim foi abordado o conceito dos motores de combustão interna, seu funcionamento e principais componentes, enfatizando seus ciclos termodinâmicos e os cálculos utilizados para análise de desempenho.

De forma a garantir uma análise de desempenho mais acurada, buscando economia de combustível e diminuição da emissão de gases poluente, o bio-óleo foi adquirido pelo processo de pirólise rápida de biomassa de eucalipto por micro-ondas, e analisado por uma empresa especializada, fornecendo todas as características primordiais para os cálculos. Também será assumido as características do óleo Diesel segundo bibliografias e todos os dados do motor segundo seu fabricante.

A análise de desempenho do motor será dividida em duas etapas. A primeira consistirá em uma análise numérica, onde, por meio do *software* Microsoft ExcelTM serão levantados os dados do motor e realizado os cálculos pertinentes à análise. Será feito cálculos utilizando uma proporção de óleo Diesel/bio-óleo, iniciando com Diesel puro e aumentando a concentração de bio-óleo em 5%v a cada análise até atingir o valor de 15%v de bio-óleo na mistura. Essa primeira análise visa utilizar cálculos teóricos para obter valores de torque, potência, temperatura e emissão de poluentes.

A segunda etapa da análise será realizada em laboratório e consistirá em um procedimento experimental. Os testes serão realizados em um motor Nagano ND3200M; os gases de escape do motor serão coletados e analisados. As condições de contorno serão as mesmas para a análise teórica e aos dados coletados nessa etapa serão comparados com os dados previamente calculados.

A comparação dos dados teóricos com os obtidos em laboratório fornecerá informações suficientes para considerar a utilização do bio-óleo como combustível como um possível substituto para os combustíveis fósseis no futuro.

3.2.1 Materiais e métodos para a análise experimental

Para a análise experimental foi selecionado um motogerador da marca Nagano modelo ND3200M, ilustrado na Figura 10. Esse motor foi escolhido pela sua disponibilidade e a facilidade de implementação de instrumentos de medição necessários para os testes. Suas especificações estão citadas na Tabela 5.



Figura 10 - Motogerador Nagano ND3200M
Fonte: Nagano, 2018

Tabela 5 - Especificações do motor

Tipo	4 Tempos, 1 Cilindro, refrigerado a ar
Potência	7 HP / 3600 rpm
Cilindrada	296cc
Partida	Manual
Combustível	Diesel
Capacidade do tanque	15 litros
Capacidade do óleo do cárter	1,1 litro
Autonomia (50% da carga)	12h
Alerta de nível de óleo	Sim
Sistema de acionamento	Auto excitação
Nível de Ruído	68 db

Fonte: Nagano, 2018

As especificações do motor, ilustradas na Tabela 5, foram obtidas no catálogo da Nagano (2018) e foram utilizadas para calcular as condições de operação normal.

Tomando como base os dados do fabricante, foi definido um modelo para a análise experimental como descrito no esquema ilustrado na Figura 11.

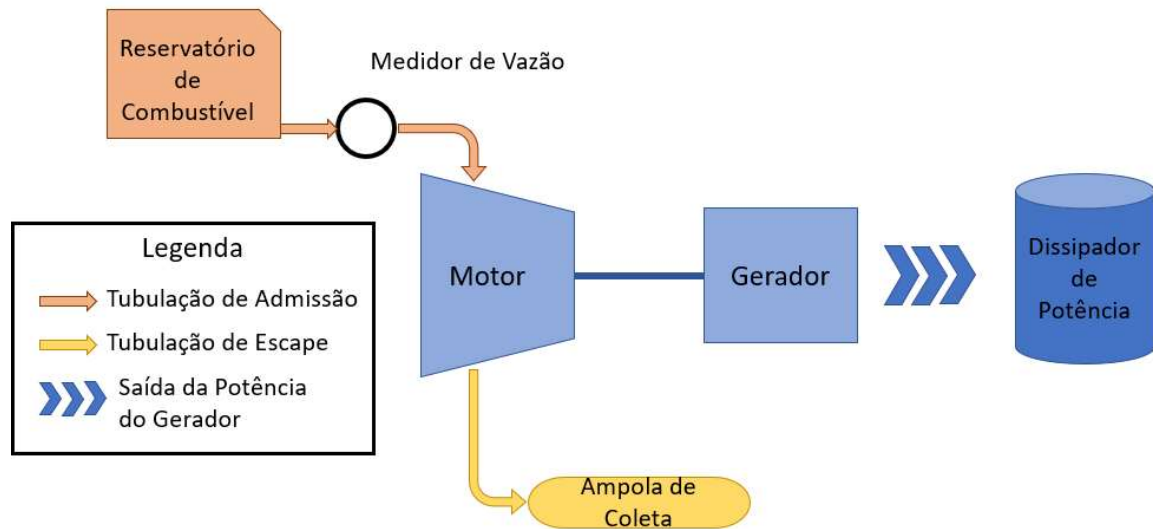


Figura 11 - Modelo utilizados na análise experimental
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

Foi utilizado um sensor de vazão para cálculo do consumo de combustível e um banco de resistor para dissipar a potência gerada pelo conjunto motogerador. A Figura 12 traz o sensor de vazão utilizado e a Figura 13 ilustra o sistema de aquecimento de água que foi utilizado como banco de resistência, para poder dissipar a potência gerada pelo gerador. A tensão e a corrente que passa por essa resistência foi medida como forma de controle, mantendo-se o valor constante de 3,75kVA durante todo o teste, como o indicado pelo fabricante.

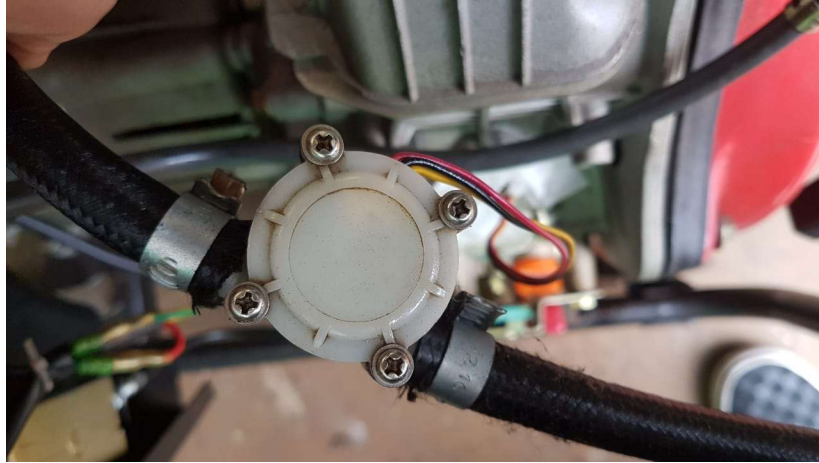


Figura 12 - Medidor de Vazão
Fonte: Pesquisa Direta, 2018



Figura 13 - Tanque com Resistência Elétrica
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

Para um maior controle do combustível foi utilizado um recipiente plástico adaptado como tanque de combustível. Foi definido também um tempo de teste de uma hora, e o motor funcionaria por aproximadamente trinta minutos antes do início dos testes para atingir a temperatura de trabalho ideal para seu funcionamento.

O combustível utilizado (Diesel e Bio-óleo) foi misturado em um misturador do tipo agitador mecânico por cerca de vinte minutos, e pré-aquecida a uma temperatura de aproximadamente 60°C, em banho-maria. O misturador mecânico está apresentado na Figura 14.

Para análise dos gases de combustão, foi utilizado uma ampola de vidro, ilustrada na Figura 15 para a coleta, e um Aparelho de Orsat para análise da amostra, como visto na Figura 16. Com esse aparelho é possível analisar a concentração de CO₂, O₂ e CO.



Figura 14 - Misturador Mecânico
Fonte: Lobov, 2018



Figura 15 - Ampola de Coleta de Gases
Fonte: Pesquisa Direta, 2018



Figura 16 - Aparelho de Orsat
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

3.3 Variáveis e Indicadores

Segundo Lakatos e Marconi (2006), variável é uma classificação, medida ou conceito operacional que apresenta valores ou propriedades. Diante disso, o presente trabalho dispõe das seguintes variáveis e indicadores a serem analisados, conforme Tabela 5.

Tabela 6 - Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Potência do motor	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência térmica do motor • Trabalho de ciclo Diesel • Cilindrada do motor • Relação de compressão do motor • Tempos do motor • Poder calorífico do Diesel • Massa específica do Diesel • Poder Calorífico do bio-óleo • Massa específica do bio-óleo
Torque do motor	<ul style="list-style-type: none"> • Potência do motor • Rotação do motor
Consumo do motor	<ul style="list-style-type: none"> • Vazão mássica de entrada do Diesel • Vazão mássica de entrada do bio-óleo • Potência efetiva do motor
Emissão do motor	<ul style="list-style-type: none"> • Gases de escape

Fonte: Pesquisa direta, 2018

3.4 Instrumento de Coleta de Dados

A coleta de dados consiste em reunir informações pertinentes à pesquisa, e organiza-las de forma a permitir uma análise posterior. A coleta de dados tem a principal função de criar um embasamento teórico por meio de revisões bibliográficas, observações e experimentos. Como citado previamente, este trabalho consiste em uma pesquisa descritiva e em uma pesquisa

experimental. Para a pesquisa descritiva, a coleta de dados será através de pesquisa bibliográfica, buscando dados e informações em livros, teses, catálogos e manuais.

Para a pesquisa experimental, será utilizado um motogerador Nagano ND3200N de 7HP. Esse motor será equipado com sensores a fim de medir o consumo de combustível e a rotação do mesmo, e serão programados através de um Arduíno UNO. Os gases de escape do motor serão coletados e analisados posteriormente em um aparelho de Orsat.

3.5 Tabulação dos Dados

Para tabular os dados obtidos nas pesquisas descritiva e experimental será utilizado o *software* Microsoft Excel™, pois permite uma maior facilidade em determinar os resultados através das variáveis, e auxilia na comparação dos mesmos para diferentes testes e com os cálculos teóricos. Também será utilizado o *software* Microsoft Word™ para facilitar a diagramação do trabalho, e relatar e discutir os resultados obtidos.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as formas de pesquisas adotadas para este trabalho, assim como as ferramentas e técnicas utilizadas para realizar a análise de desempenho de um motor de combustão interna utilizando uma mistura de Diesel e bio-óleo como combustível, dando enfoque nos materiais e métodos utilizados para realizar a pesquisa, na coleta e tabulação dos dados obtidos.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos da análise de desempenho do motor de combustão interna funcionando com óleo Diesel puro e com a mistura de óleo Diesel e bio-óleo, detalhando os procedimentos utilizados para a realização da análise, dos cálculos e por fim será feita uma discussão dos resultados.

4 RESULTADOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados do desenvolvimento da análise de desempenho de um motor de combustão interna operando com bio-óleo de pirólise como aditivo ao combustível. Também são detalhados os dados de entrada do problema, assim como todos os cálculos teóricos realizados em software Microsoft EXCEL e a montagem para testes práticos, apresentando por fim os resultados obtidos no mesmo.

As equações dispostas no capítulo 2 são a base para os cálculos expostos nesse capítulo. Serão mostrados os resultados e as discussões referentes a cada um.

4.1 Análise Teórica

Para a análise teórica foi selecionado um motogerador da marca Nagano modelo ND3200M, ilustrado na Figura 10 com as especificações mostradas na Tabela 5. As especificações do motor foram utilizadas para calcular as condições de operação normal. Alguns parâmetros importantes para a realização da análise teórica foram:

- Pressão de entrada: 101,325 kPa;
- Temperatura de Entrada: 25°C (298,15 K);
- Relação de compressão de 17:1;
- Composição do óleo Diesel como sendo $C_{14,4}H_{24,9}S_1$ (COSTA, 2007).
- Poder calorífico inferior do óleo diesel considerado de 42900 kJ/kg (COSTA, 2007);
- Massa específica do óleo diesel considerada de 849,7 kg/m³ (COSTA, 2007);
- A rotação e a potência do motor foram consideradas constantes devido ao gerador acoplado ao motor;
- Fluido de trabalho é considerado como gás perfeito para os cálculos teóricos;

A Tabela 7 mostra os parâmetros considerados para o cálculo do motor assim como alguns resultados obtidos utilizando as equações 1 a 27 expressas no capítulo 2. Cabe salientar que os pontos indicados na Tabela 7 são provenientes da Figura 9. Já a Tabela 8 mostra o desempenho teórico calculado com os dados de entrada mencionados.

Tabela 7 - Condições de Operação Teóricas Ideais do Motor com óleo diesel

Parâmetros de Entrada	Volume (L)	0,296
	Diâmetro do Cilindro (mm)	78
	Curso do Pistão (mm)	62
	Potência Máxima a 3600 rpm (kW)	4,40
	Potência Contínua a 3600 rpm (kW)	4,00
	Relação de compressão	17
	Consumo de Combustível - 50% (L/h)	1,25
	Calor de Entrada [kW]	12,66
	Poder calorífico (kJ/kg)	42900
	Massa Específica (g/cm ³)	0,8497
Admissão	Pressão de Entrada [kPa] =	101,325
	Temperatura de Entrada [K] =	298,15
	Volume Específico na Entrada [m ³ /kg] =	0,8436
Compressão	Calor específico a pressão constante [kJ/kmol.K] =	30,097
	Coefficiente Isentrópico =	1,382
	Temperatura no ponto 2 [K] =	879,24
	Pressão no ponto 2 [kPa] =	5079,69
	Volume Específico no ponto 2 [m ³ /kg] =	0,0496
	Massa do sistema [kg] =	0,0004
Combustão	Pressão no ponto 3 [kPa] =	5079,69
	Calor fornecido ao sistema [kJ/kg] =	565,35
	Calor específico a pressão constante [kJ/kg.K] =	1,2302
	Temperatura no ponto 3 [K] =	1338,82
	Constante dos gases no ponto 3 [kJ/kg.K] =	0,2842
	Volume Específico no ponto 3 [m ³ /kg] =	0,0749
Exaustão	Volume Específico no ponto 4 [m ³ /kg] =	0,8436
	Calor específico a pressão constante [kJ/kg.K] =	1,205
	Coefficiente Isentrópico =	1,308
	Temperatura no ponto 4 [K] =	634,27
	Pressão no ponto 4 [kPa] =	213,64
	Trabalho do Motor [kJ] =	0,133
	Pressão média efetiva [kPa] =	450,06

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

Tabela 8 - Desempenho do Motor Teórico Ideal

Potência do Motor [kW]	4,00
Calor rejeitado (gases de exaustão) [kW]	8,49
Calor rejeitado (óleo lubrificante) [kW]	0,08
Radiação e outras perdas [kW]	0,08
Eficiência	31,6%

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A Tabela 7 traz as condições de operação do motor a partir de valores de entrada definidos anteriormente. É importante ressaltar os dados de rotação e consumo do combustível, fornecidos pelo fabricante, que serão utilizados para o cálculo da vazão dos gases e do consumo quando utilizado a mistura de Diesel e Bio-óleo. A composição e características do Diesel foi considerada a partir das definições de Costa (2007), como sendo $C_{14,4}H_{24,9}S_1$. Vale também apontar que, devido a características do motor, a rotação e potência de saída são definidas e mantidas em valores constantes pelo gerador elétrico acoplado. Esses valores foram retirados do manual do motor

A Tabela 8 apresenta a potência gerada pelo motor e as perdas de energia pelos calores rejeitados nos gases, refrigeração, lubrificação e outras perdas, apresentando também a eficiência do motor de 31,6%.

Adotando o mesmo procedimento e todas as considerações feitas, foram elaborados cálculos para a análise do ciclo do motor usando agora as misturas de óleo diesel e bio-óleo. Os primeiros cálculos, já apresentados pela Tabela 8, representam o funcionamento do motor operando com Diesel.

Nas demais três análises foram consideradas as misturas de combustível:

- 95% de Diesel e 5% de Bio-óleo (95 D - 5 BO);
- 90% de Diesel e 10% de Bio-óleo (90 D - 10 BO);
- 85% de Diesel e 15% de Bio-óleo (85 D - 15 BO).

O poder calorífico das misturas foi calculada e está mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Poder Calorífico Inferior das Misturas de Combustível

Combustível	PCI (kJ/kg)
100% Diesel	42900,00
95% Diesel – 5% Bio-óleo	41630,00
90% Diesel – 10% Bio-óleo	40360,00
85% Diesel – 15% Bio-óleo	39090,00

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A partir desses cálculos foram feitas análises do consumo de combustível, do fluxo de gases de exaustão e da potência gerada, conforme mostra a Tabela 10.

Tabela 10 – Condições Teóricas de Operação do Motor Operando com mistura Diesel-Bio-óleo

Parâmetros de Entrada	Misturas Diesel-Bio-óleo ⇔	95D – 5BO	90D – 10BO	85D – 15BO
		Potência Contínua a 3600 rpm (kW)	4,00	4,00
	Consumo de Combustível (L/h)	1,26	1,27	1,29
	Calor de Entrada [kW]	12,66	12,66	12,66
	Poder calorífico (kJ/kg)	41630,0	40360,00	39090,00
	Massa Específica (g/cm ³)	0,8682	0,8867	0,9052
Admissão	Pressão na entrada [kPa] =	101,325	101,325	101,325
	Temperatura na entrada [K] =	298,15	298,15	298,15
	Volume Específico na entrada [m ³ /kg] =	0,8436	0,8436	0,8436
Compressão	Calor específico a pressão constante [kJ/kmol.K] =	30,097	30,097	30,097
	Coefficiente Isentrópico =	1,382	1,382	1,382
	Temperatura no ponto 2 [K] =	879,24	879,24	879,24
	Pressão no ponto 2 [kPa] =	5079,69	5079,69	5079,69
	Volume Específico no ponto 2 [m ³ /kg] =	0,04962	0,04962	0,04962
	Massa do sistema [kg] =	0,0004	0,0004	0,0004
Combustão	Pressão no ponto 3 [kPa] =	5079,69	5079,69	5079,69
	Calor fornecido [kJ/kg] =	565,49	565,49	565,49
	Calor específico a pressão constante [kJ/kg.K] =	1,2300	1,2298	1,2295
	Temperatura no ponto 3 [K] =	1339,00	1339,07	1339,16
	Constante dos gases no ponto 3 [kJ/kg.K] =	0,2841	0,28394	0,28382
	Volume Específico no ponto 3 [m ³ /kg] =	0,07488	0,07485	0,07482
Exaustão	Volume Específico no ponto 4 [m ³ /kg] =	0,84362	0,84362	0,84362
	Calor específico a pressão constante [kJ/kg.K] =	1,205	1,205	1,205
	Coefficiente Isentrópico =	1,308	1,308	1,308
	Temperatura no ponto 4 [K] =	634,45	634,57	634,70
	Pressão no ponto 4 [kPa] =	213,63	213,58	213,53
	Trabalho do Motor [kJ] =	0,133	0,13333	0,13333
	Pressão média efetiva [kPa] =	450,06	450,06	450,06

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A Tabela 10 apresenta os cálculos do ciclo do motor utilizando as misturas de combustível citadas. Dentre as considerações necessárias a serem feitas está o fato de a rotação e a potência do motor serem bloqueadas pelo gerador acoplado a ele. Portanto, a rotação e a potência foram consideradas valores constantes em todos os cálculos, variando somente o consumo de combustível de acordo com a demanda de energia do motor. O resultado está ilustrado na Figura 17.

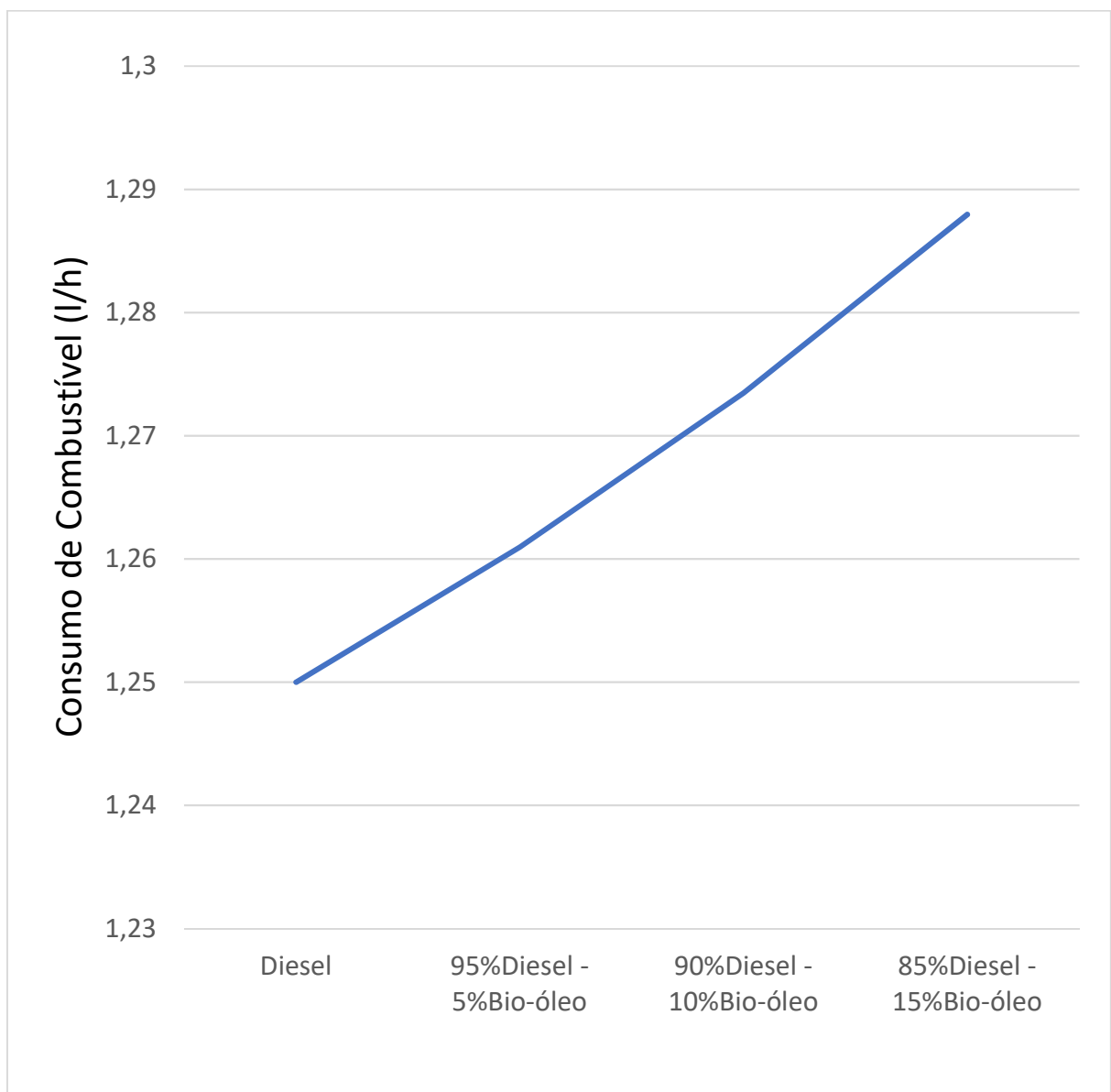


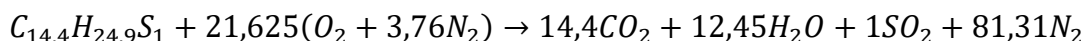
Figura 17 - Consumo de combustível do motor
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

Pode se perceber que o consumo de combustível apresentado na Figura 17 tende a aumentar conforme aumenta a concentração de Bio-óleo na mistura, um comportamento já previsto pelo fato de o Bio-óleo ter um menor poder calorífico. Mas ainda assim o aumento só contabiliza 3% (aproximadamente 30 ml/h).

4.1.1 Cálculo Teórico da Combustão

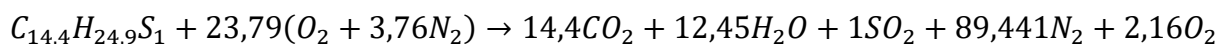
Para início da análise da eficiência da adição do Bio-óleo no funcionamento de um motor Diesel, é importante os cálculos teóricos de combustão e de temperatura de chama para verificar a energia liberada pelos combustíveis na reação. Também é interessante o cálculo das concentrações de poluentes nos gases da queima.

Para calcular a reação de combustão do Diesel foi utilizado o conceito de estequiometria, onde toda a queima do combustível ocorre instantaneamente. Considerando a composição do Diesel como $C_{14,4}H_{24,9}S_1$ e o Ar sendo composto de 79% de N_2 e 21% de O_2 , a equação estequiométrica da reação de combustão é:



Pela análise da reação estequiométrica é possível visualizar que para cada mol do composto do Diesel são necessários 21,625 moles de ar para realizar a combustão completa.

Já considerando o excesso de ar de 10%, a reação química de combustão fica da seguinte maneira:

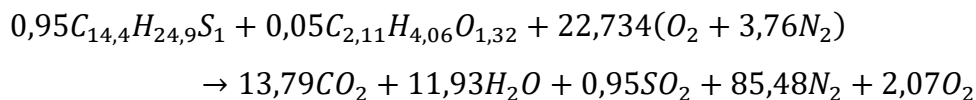


E equação apresenta que com o acréscimo de 10% de ar, a relação de ar na reação sobe para 23,79 partes de ar para cada parte de Diesel.

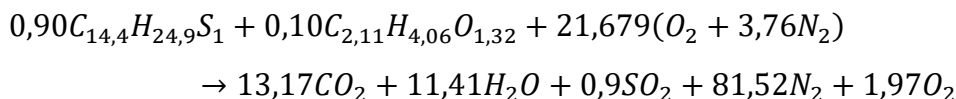
Com o acréscimo gradativo de bio-óleo na combustão, é possível ver uma mudança significativa nas relações de combustível e ar, e também na composição dos gases produzidos

na reação. Abaixo estão explicitadas as reações de combustão para as três misturas contendo Bio-óleo e já considerado o acréscimo de 10% de ar.

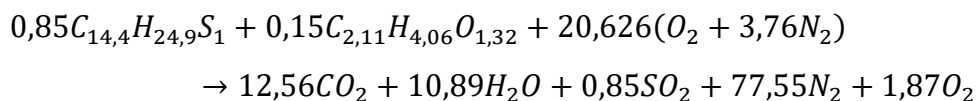
- 95% de Diesel e 5% de Bio-óleo:



- 90% de Diesel e 10% de Bio-óleo:



- 85% de Diesel e 15% de Bio-óleo:



Analisando as equações das misturas é possível perceber que existe uma diminuição da quantidade de ar necessária para a combustão total da mistura, um indicativo de que o bio-óleo necessita de menos comburente para reagir e conseqüentemente gastaria um menor tempo de reação, liberando uma taxa de energia maior.

Para obter um parâmetro de comparação, também foi feito os cálculos de temperatura de chama utilizando os calores de formação dos reagentes da combustão. A Tabela 11 e a Figura 18 apresentam esses resultados.

Tabela 11 - Temperatura de Chama

Misturas ⇨	100% Diesel	95% Diesel 5% Bio-óleo	90% Diesel 10% Bio-óleo	85% Diesel 15% Bio-óleo
Excesso de ar (α) ↓	Temperatura de chama (K)			
0,80	2734,28	2730,38	2726,11	2721,40
0,85	2712,11	2708,25	2704,02	2699,36
0,90	2690,26	2686,44	2682,25	2677,64
0,95	2668,73	2664,95	2660,80	2656,23
1,00	2600,47	2596,75	2592,66	2588,17
1,05	2525,47	2521,89	2517,97	2513,65
1,10	2454,97	2451,53	2447,77	2443,62
1,15	2388,62	2385,31	2381,69	2377,69
1,20	2326,08	2322,89	2319,40	2315,55
1,25	2267,05	2263,97	2260,60	2256,89

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

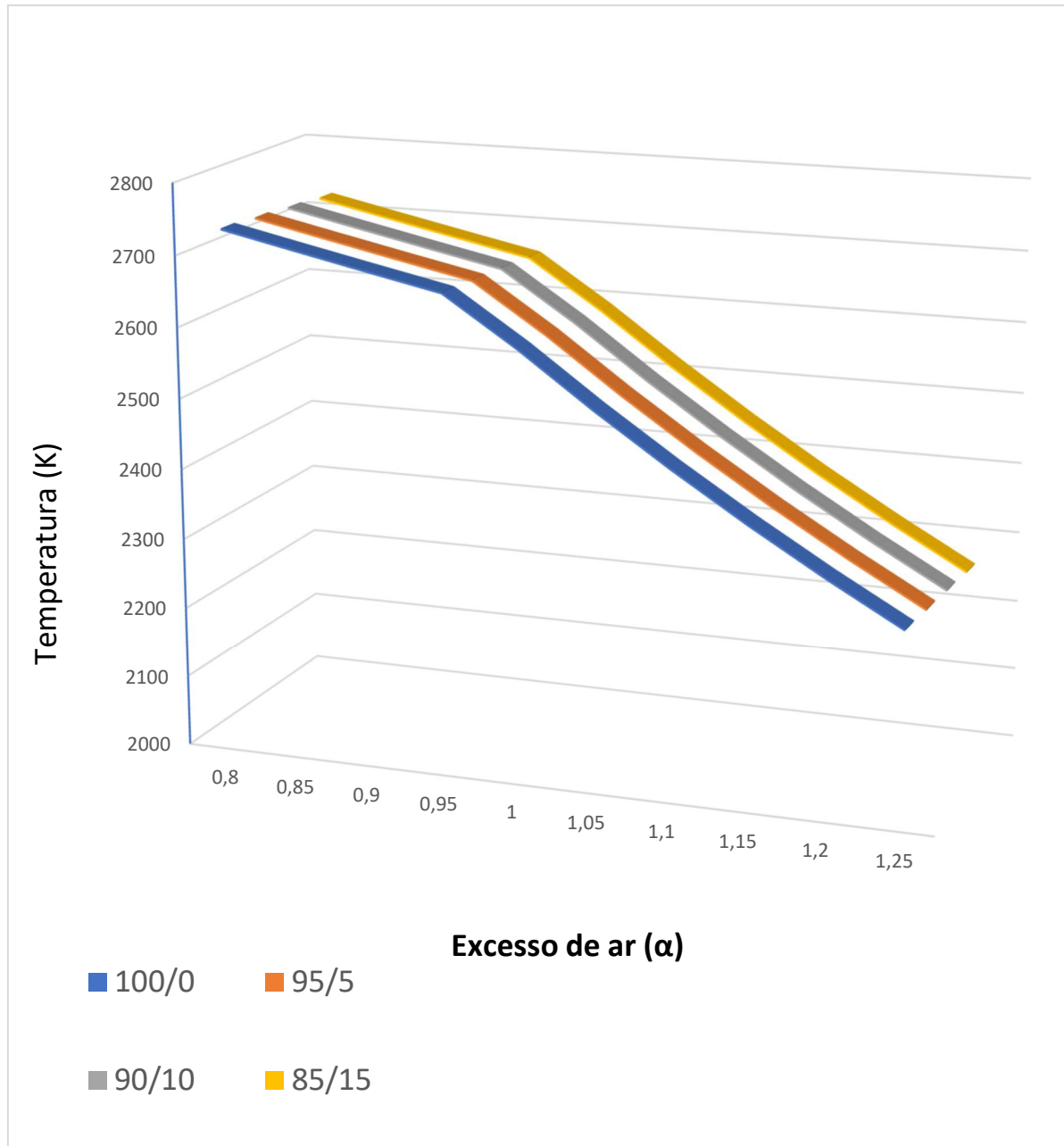


Figura 18 – Resultados de Temperatura de Chama Adiabática
 Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A Tabela 10 e a Figura 18 apresentam as temperaturas de chama adiabática teóricas das misturas de combustível. Nesse caso, a diferença das temperaturas é menor, e o comportamento diferente. A temperatura de chama tende a cair conforme é adicionado o bio-óleo na mistura, ainda que a diferença seja pequena entre os cálculos com 100% de Diesel e com o acréscimo de 15% de bio-óleo.

4.1.2 Comparativo dos Gases de Combustão

Através de uma análise das equações de reação de combustão apresentadas nos itens 4.3.2 e 4.3.3, é possível perceber uma variação na emissão de gases prejudiciais ao meio ambiente, como CO₂ e SO₂. Além da diminuição apresentada nas equações, como ilustrado na Tabela 12, é necessária uma análise dessa emissão por quilograma de combustível, possibilitando assim a comparação com outras amostras.

Tabela 12 - Concentração Teórica de Poluentes por kg de combustível

Composição	Concentração de Poluentes (kg poluente/kg comb.)	
	CO ₂	SO ₂
Diesel	2,7584	0,2786
95% D 5% BO	2,7479	0,2754
90% D 10% BO	2,7365	0,2720
85% D 15% BO	2,7241	0,2682

Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A Tabela 11 apresenta as concentrações dos gases CO₂ e SO₂ nos gases provenientes da queima dos combustíveis já descritos. A redução da concentração de SO₂ já era prevista, uma vez que o bio-óleo não traz enxofre em sua composição. Já a redução da concentração de CO₂, mesmo que pequena, é um ótimo indicativo pois reduz a emissão de um poluente altamente prejudicial ao meio ambiente.

4.2 Análise Experimental

Tomando como base os dados do fabricante, foi definido um modelo para a análise experimental como descrito no esquema ilustrado na Figura 11, que será replicada aqui.

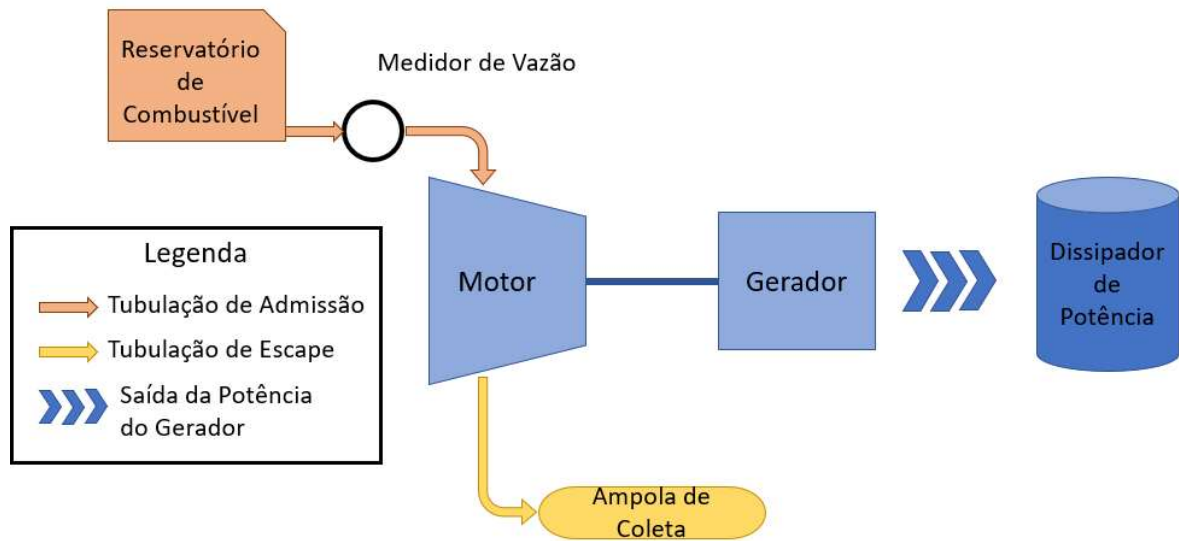


Figura 11 - Modelo utilizados na análise experimental
 Fonte: Pesquisa Direta, 2018

Para definir os parâmetros de injeção de combustível foi utilizada as análises do bio-óleo feitas em laboratório e apresentadas na Tabela 13, levando em consideração principalmente a viscosidade da amostra e as características obtidas na literatura para manter a viscosidade máxima da mistura indicada para funcionar um motor a Diesel.

Tabela 13 - Composição do Bio-óleo

Componentes Químico	Fórmula	(%)p
Metanol	CH ₄ O	3,7%
Acetona	C ₃ H ₆ O	0,5%
Acetato de Metila	C ₃ H ₆ O ₂	2,2%
2,3 Butanodiona	C ₄ H ₆ O ₂	0,9%
2 Butanona	C ₄ H ₈ O	0,3%
Ácido Acético	C ₂ H ₄ O ₂	12,9%
Acetol	C ₃ H ₆ O ₂	2,1%
Butanodiol	C ₄ H ₁₀ O ₂	0,4%
Furfural	C ₅ H ₄ O ₂	4,5%
Álcool Fulfurílico	C ₅ H ₆ O ₂	1,0%
2-Propanona-1-hidroxi acetato	C ₅ H ₁₀ O ₃	0,4%
Dimethoxitetrahydrofurano	C ₆ H ₁₂ O ₃	0,6%
2 Metil-2-ciclopentanona	C ₆ H ₈ O	0,5%
Etanona-1-2-Furanil	C ₆ H ₆ O ₂	0,2%
1-2-Ciclopentanodiona	C ₅ H ₆ O ₂	0,7%
2-Furancarboxaldeido, 5-metil	C ₆ H ₆ O ₂	1,7%
Corilon	C ₆ H ₈ O ₂	1,7%
p-cresol	C ₇ H ₈ O	1,2%
2-Metoxi-fenol	C ₇ H ₈ O ₂	2,5%
4-Metoxi-3-metilfenol	C ₈ H ₁₂ O ₂	0,2%
2-metoxi-p-cresol	C ₈ H ₁₀ O ₂	3,0%
1,2-Benzenodiol, 3-metoxi	C ₇ H ₈ O ₃	2,6%
2-Metoxi-4-metilfenol	C ₈ H ₁₀ O ₂	0,8%
1,2-Benzenodiol, 4-metil	C ₇ H ₈ O ₂	0,3%
2,6-Dimetoxifenol	C ₈ H ₁₀ O ₃	4,5%
1,2,4-Trimetoxibenzeno	C ₉ H ₁₂ O ₃	3,0%
Benzeno, 1,2,3-trimetoxi-5-metil	C ₁₀ H ₁₄ O ₃	3,6%
Alcatrão	C _{6,1} H _{7,3} O _{0,7}	17,3%
Água	H ₂ O	16,5%
Não identificado	---	10,1%

Fonte: Adaptado OndaTec, 2018

A Tabela 13 apresenta a composição do bio-óleo utilizado nesse trabalho em relação aos componentes químicos presentes. Para efeito de cálculo, foi utilizada uma fórmula simplificada desse composto: $C_{2,19}H_{4,06}O_{1,32}$.

Durante as primeiras misturas, foi verificado que o Bio-óleo não dilui bem no Diesel, como pode ser visto na Figura 19. Para possibilitar os testes e tentar impedir problemas dentro do motor, foi utilizado então uma fração de etanol para diluir o bio-óleo e, essa mistura, incorporada ao Diesel.



Figura 19 - Mistura Diesel e Bio-óleo, com precipitação de Bio-óleo
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

Tendo em vista essa necessidade, então a mistura a ser utilizada nos testes experimentais são as seguintes:

- 100% de Diesel;
- 90% de Diesel, 5% de Etanol e 5% de Bio-óleo;
- 80% de Diesel, 10% de Etanol e 10% de Bio-óleo;
- 70% de Diesel, 15% de Etanol e 15% de Bio-óleo.

Tendo em vista todos os parâmetros de entrada definidos, a análise experimental foi iniciada utilizando primeiramente apenas Diesel como combustível. Os dados da análise foram coletados conforme descrito no item 3.2.1. Também foi utilizado um Arduino Uno para a aquisição dos dados, que foram exportados para planilhas do Excel para a compilação.

Como principal característica a ser obtida na análise experimental, o consumo do combustível foi adquirido durante um período de uma hora após um pré-aquecimento de trinta minutos, com o motor rodando nas mesmas configurações. A Figura 20 mostra o consumo de diesel ao longo do experimento.

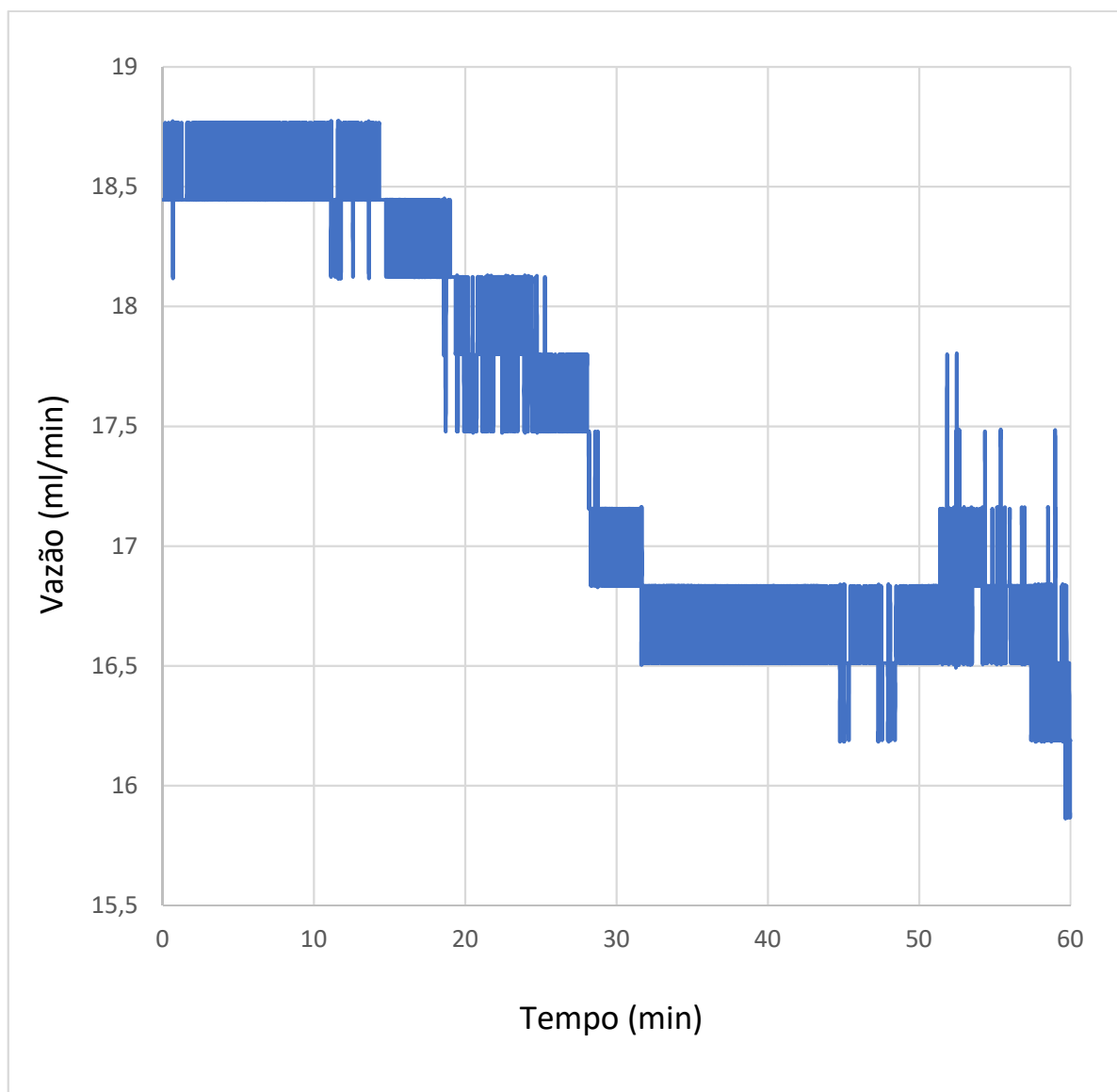


Figura 20 - Consumo de Combustível com Diesel
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A Figura 20 apresenta o consumo de combustível do motor funcionando apenas com Diesel. É possível notar uma redução no consumo com o passar do tempo, caracterizada possivelmente pela variação da temperatura do próprio motor. Os valores de vazão mantem uma média de aproximadamente 17,4 mililitros por minuto (1,04 l/h), se aproximando dos cálculos teóricos de 1,25 l/h.

Para a análise experimental utilizando a mistura de combustível com o bio-óleo em 5%, o mesmo procedimento foi realizado para a preparação dos testes. Porém, devido a presença do bio-óleo, que é um líquido mais viscoso que o Diesel e que não incorporou bem à mistura, o motor funcionou por apenas trinta minutos após o início do teste, impossibilitando a

continuidade do mesmo e a realização com as misturas contendo 10% e 15% de Bio-óleo. A Figura 21 mostra o consumo de combustível no motor, agora utilizando a mistura de 5% de bio-óleo.

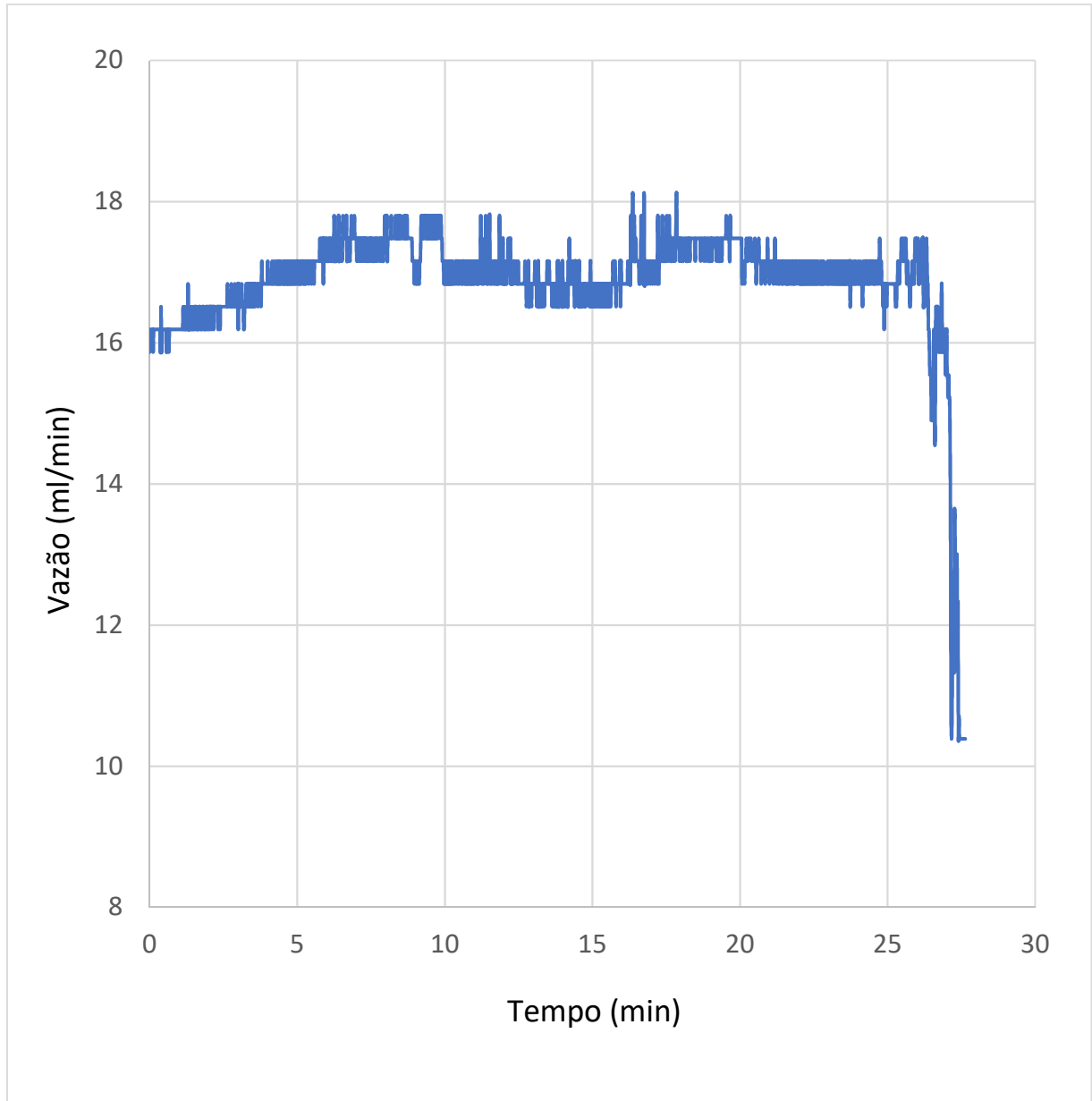


Figura 21 - Consumo de combustível com 5% de Bio-óleo
Fonte: Pesquisa Direta, 2018

A Figura 21 apresenta os dados coletados durante os testes com o motor funcionando com a mistura de 95% de Diesel e 5% de Bio-óleo. O teste só durou trinta minutos, e nos minutos finais, o motor começou a engasgar, representado no gráfico acima pela queda brusca na vazão de combustível.

É possível perceber também que existe uma redução no consumo de combustível em relação ao teste com Diesel puro. A média da vazão de combustível nesse caso ficou próxima de 16,87 mililitros por minuto (1,01 l/h), o que apresenta um resultado diferente ao previsto nos cálculos teóricos. Esse resultado da redução do consumo pode ser caracterizado por uma queima consideravelmente mais rápida do bio-óleo.

As análises dos gases da queima no Aparelho de Orsat, por questão dos problemas apresentados pelo motor, não foram concluídas, uma vez que só foi possível recolher as amostras dos gases da queima do Diesel puro.

4.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados todos os cálculos teóricos necessários e as análises experimentais pertinentes para conhecer a eficiência do bio-óleo como combustível junto ao Diesel. Foi também detalhado todo o passo-a-passo utilizado para tais análises, o *software* utilizado para o cálculo e compilação dos dados, foi o Microsoft Excel.

O próximo capítulo traz as conclusões desse trabalho, respondendo à pergunta problema, apresentando os objetivos alcançados, sintetizando os resultados obtidos nas análises teóricas e experimentais, assim como recomendações para trabalhos futuros de acordo com o que foi visto na prática durante a realização deste.

5 CONCLUSÃO

Esse capítulo finaliza o presente trabalho, apresentando suas conclusões, seguidas pelas sugestões para possíveis futuras pesquisas.

5.1 Conclusões

Hoje em dia a busca por fontes de energia alternativas ao petróleo é prioridade, tendo em vista sua alta capacidade de poluição e não sendo fontes de energia renováveis. Dessa forma, desde a década de 1970, a discussão sobre esse assunto se tornou um tema estratégico na comunidade internacional, passando a incorporar principalmente áreas de interesse sustentável e ambiental.

Para este trabalho, foi apresentada a ideia de utilizar um combustível derivado de uma planta, para diminuir o consumo de combustíveis fósseis em motores de combustão interna. O combustível escolhido foi um bio-óleo proveniente do processo de pirólise por micro-ondas da madeira de *Eucalypto Citriodora*. Esse bio-óleo foi utilizado junto com Diesel para análise em um motogerador mono cilíndrico, com o intuito de obter seu desempenho como combustível.

Visando obter resultados consistentes, foram feitos estudos teóricos em motores, processo de pirólise, e em análise de desempenho, focando nas equações para o cálculo do Ciclo ideal Diesel. Esses cálculos possibilitaram a obtenção de valores teóricos de consumo de combustível, que aumentam conforme aumenta a quantidade de bio-óleo adicionado à mistura com Diesel. Obtendo valores de 1,25 l/h com o Diesel puro, subindo gradativamente até 1,29 l/h com 15% de bio-óleo.

Foi utilizado o *Software* Microsoft Excel para obtenção das temperaturas de chama da queima dos combustíveis, e da definição do excesso de ar a ser utilizado. Os dados obtidos apontam que quanto maior a quantidade de bio-óleo, menor a temperatura de chama.

Neste trabalho também foi definido um modelo para a análise experimental. Os testes duraram uma hora cada e foram coletados a vazão do combustível e os gases da queima para análise em um Aparelho de Orsat.

Os testes utilizando Diesel puro ocorreu perfeitamente, e apresentou um consumo de Diesel de 1,044 l/h, valores muito próximos ao calculado de forma teórica. Já no momento dos testes com o bio-óleo, por causa de sua alta viscosidade e baixa miscibilidade no Diesel, a mistura de combustível entupiu o injetor de combustível, causando assim a parada total do motor. Esse teste ocorreu por trinta minutos e obteve uma vazão média de 1,011 l/h de combustível, o que caracteriza uma melhora no consumo de combustível com a adição do Bio-óleo.

Considerando a diminuição do consumo de combustível e o fato de o Bio-óleo ser proveniente de uma fonte vegetal e renovável, os resultados obtidos nesse trabalho foram satisfatórios, principalmente para pesquisas de combustíveis alternativos e fontes renováveis de energia com redução da poluição.

Também é importante apontar que, de acordo com o que foi visto durante a análise experimental, o bio-óleo aparenta possuir uma alta reatividade com metais, visto que o tanque de combustível do próprio motor ficou todo incrustado com o bio-óleo, efeito que não aconteceu quando foi utilizado um reservatório de combustível de plástico.

5.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Partindo das conclusões desse trabalho e dos problemas ocorridos durante sua execução, pode-se citar algumas sugestões para trabalhos futuros, como:

- Análise da viabilidade econômica do uso do bio-óleo de pirólise como combustível para motores de combustão interna;
- Análise da reatividade do bio-óleo com os metais utilizados em motores de combustão interna;
- Processo de refino do bio-óleo para utilização em motores de combustão interna.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRES, R. D., LOPES, T. A., BARROS, R. M., CONEGLIAN, C. M. R., SOBRINHO, G. D., TONSO, S., PELEGRINI, R. **Pirólise**. Em: III Fórum de Elites Contábeis 2003. Faculdades Integradas Claretianas, Rio Claro–SP.
- ALYRIO, R. D. **Metodologia Científica**. Tese de Pós-graduação - PPGEN: UFRRJ, 2008.
- BENEROSO, D.; MONTI, T.; KOSTAS. E.T.; ROBINSON, J. **Microwave pyrolysis of biomass for bio-oil production: Scalable processing concepts**. Review - Chemical Engineering Journal, 2017.
- BEZERRA, D. P. **Estudo sobre os processos físicos envolvidos nos motores que utilizam como combustíveis óleos (Ciclo Diesel). Estudo sobre a viabilidade da “Ottonização” do ciclo Diesel**. Artigo - PUC Brasília. Brasília. 2007
- BORGES, F. C. **Estudo do Processamento Termoquímico de Biomassa com Micro-ondas: Pirólise Rápida de Biomassas Residuais e Microalgas**. Tese de Doutorado – UFRS. Porto Alegre. 2014
- BORSATO, D. **Combustíveis fósseis** – carvão e petróleo. Editora Eduel. Londrina.
- BRIDGWATER, A. V. **An overview of fast pyrolysis of biomass**. Waterloo. Organic Geochemistry. p. 1479-1493. 1999.
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. São Paulo Editora Blucher. Volume 1. 2012.
- BUCUSSI, A. A. **Introdução ao conceito de energia**. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. UFRGS. 2006.
- COSTA, Y. J. R. **Análises Energética e Exergética de um Motor de Combustão Interna Operando com Mistura de Diesel e Gás Natural**. Tese de Pós-Graduação - UFCG. 2007.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES. M. A. **Termodinâmica**. 7ed.Nova Iorque McGraw Hill. 2012.

- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional**. 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2017>. Acesso em novembro de 2018.
- FARIAS, A.F.C. e SILVA, A. R. S. **Qualidade Do Óleo Diesel Brasileiro Utilizado No Município De Campina Grande-Paraíba**. Campina Grande. 2014. Disponível em: <https://docplayer.com.br/20593039-A-qualidade-do-oleo-diesel-brasileiro-utilizado-no-municipio-de-campina-grande-paraiba.html>. Acesso em dezembro de 2018
- FERREIRA, A. A.; COSTA, Y. J. R. **Análise de desempenho de um motor de combustão interna operando de forma dual (diesel + gás natural)**. UFCG. 2010.
- FERREIRA, N. L. **Pirólise de biomassa lignocelulósica utilizando diferentes catalisadores para produção de bio-óleo**. Dissertação - UFMG. Belo Horizonte. 2014.
- FOGAÇA, J. R. V. **Funcionamento do motor de combustão interna**. Disponível em <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/funcionamento-motor-combustao-interna.htm>. Acesso em outubro de 2017.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.
- GARZÓN, N. A. N. **Análise experimental e energética da operação de um motor diesel com óleo vegetal**. Dissertação – UFSC. Sata Catarina. 2012.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas. 2002
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.
- HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York. 1988.
- HOSSAIN, A. K. DAVIES, P. A. **Pyrolysis liquids and gases as alternative fuels in internal combustion engines – A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 21. 165 – 189. Janeiro de 2013.
- INFOGRÁFICO O GLOBO. **A evolução da frota de veículos no país**. Disponível em <http://infograficos.oglobo.globo.com/brasil/a-evolucao-da-frota-de-veiculos-do-pais.html>. Acesso em novembro de 2017.

- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook**. 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/weo2017/>. Acesso em novembro de 2018.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica**. Editora Atlas. São Paulo. 2006.
- LIMA, F. L. M; SOARES, I. F. M.; COSTA, M. M. S. G.; SILVA, N. F. P. M.; SOUSA, P. J. S. C. P. **Motores de combustão interna**. FEUP. Universidade do Porto. Porto. 2009.
- Manual de Instruções NAGANO ND3200M. Disponível em <http://www.naganoprodutos.com.br/novosite/canais/produtos/vitrine.asp?codProduto=486>. Acesso em novembro de 2018
- MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. 2ª edição. Cidade do Porto. Publindústria. 2006.
- MINAYO, M. C. S. **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 22 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.
- MUSHTAQ, M.; MAT, R.; ANI, F. N. **A review on microwave assisted pyrolysis of coal and biomass for fuel production**. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. 39. 555–574
- O PROGRESSO. **Frota de veículos cresce 119% em dez anos no Brasil**. Disponível em <http://www.progresso.com.br/caderno-a/veiculos/frota-de-veiculos-cresce-119-em-dez-anos-no-brasil-aponta-denatran>. Acesso em novembro de 2017.
- PÉREZ, J. M. M. RODRÍGUEZ, R. A. V.; MESA, H. R. M.; ROCHA, J. D.; SAMANIEGO, M. R. P.; CORTEZ, L. A. B. **Bio-Flex Obtido Da Pirólise De Biomassa Como Combustível**. Bioware. Campinas. 2007.
- PORTILHO, G. **Quanto tempo vai durar o petróleo no mundo**. Disponível em <https://mundoestranho.abril.com.br/ambiente/quanto-tempo-vai-durar-o-petroleo-no-mundo/>. Acesso em novembro de 2017.
- ROMANZOTI, N. **Quem inventou o carro**. Disponível em <https://hypescience.com/quem-inventou-o-carro/>. Acesso em outubro de 2017.

- SANTOS, T. L. **Emissões de poluentes por veículos automotores**. Disponível em <http://educacaopublica.cederj.edu.br/revista/artigos/emissoes-de-poluentes-por-veiculos-automotores>. Acesso em outubro de 2017.
- SILVA, C. R. O. **Metodologia do trabalho científico**. Fortaleza: Centro Federal e Educação Tecnológica do Ceará, 2004.
- TAYLOR, C. F. **The Internal-Combustion Engine in Theory and Practice**. Cambridge. The M.I.T. press. 1985.
- TILLMANN, C. A. C. **Motores de combustão interna e seus sistemas**. IF. Pelotas – RS. 2013.
- VARELLA, C. A. A. **Histórico e desenvolvimento dos motores de combustão interna**. Tese UFRRJ. Seropédica.
- VARELLA, C. A. A.; SANTOS, G de S. **Noções Básicas de Motores Diesel**. UFRRJ. Seropédica. 2010
- VIANA, A. N. C.; BORTONI, E. C.; NOGUEIRA, F. J. H.; HADDAD, J.; NOGUEIRA, L. A. H.; VENTURINI, O. J.; YAMACHITA, R. A. **Eficiência energética: fundamentos e aplicações**. 2012. Disponível em https://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/Livro_Eficiencia_Energetica.pdf. Acesso em 20/07/2018.
- VIEIRA, G. E. G.; NUNES, A. P.; TEIXEIRA, L. F.; COLEN, A. G. N. **Biomassa: uma visão dos processos de pirólise**. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 15, n. 24, p. 105-212, 2014.
- YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



DECLARAÇÃO

Certifico que o aluno **João Pedro Gurgel Sampaio**, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado “**Análise de desempenho de um motor de combustão interna utilizando bio-óleo de pirólise, diesel e suas misturas como combustível**” efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Ouro Preto, 17 de dezembro de 2018.

A handwritten signature in cursive script, reading 'Elisângela Martins Leal', is written over a horizontal line.

Profa. Dra. Elisângela Martins Leal

Orientadora