



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



RAFAEL MENDES TUKOFF DE MITA

**ANÁLISE TÉCNICA DO USO DE ETANOL EM MOTOR DE COMBUSTÃO
INTERNA USANDO O SOFTWARE DIESEL RK**

OURO PRETO - MG
2024

RAFAEL MENDES TUKOFF DE MITA
rafael.mita@aluno.ufop.edu.br

**ANÁLISE TÉCNICA DO USO DE ETANOL EM MOTOR DE COMBUSTÃO
INTERNA USANDO O SOFTWARE DIESEL RK**

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
2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T916a Tukoff, Rafael Mendes.
Análise técnica do uso de etanol em motor de combustão interna usando o software Diesel Rk. [manuscrito] / Rafael Mendes Tukoff. - 2024.
88 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Elisângela Martins Leal.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Energia. 2. Motores de combustão interna. 3. Álcool como combustível. 4. Diesel RK (Software). 5. Motores a álcool. I. Leal, Elisângela Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Rafael Mendes Tukoff de Mita

Análise técnica do uso de etanol em motor de combustão interna usando o software Diesel RK

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

Aprovada em 30 de janeiro de 2024

Membros da banca

Profª Drª Elisângela Martins Leal - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Luís Antônio Bortolaia - Universidade Federal de Ouro Preto
Profª Drª Ana Maura Araújo Rocha - Universidade Federal de Ouro Preto

Elisângela Martins Leal, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 02/02/2024



Documento assinado eletronicamente por **Elisangela Martins Leal, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/02/2024, às 14:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0660599** e o código CRC **02AB1E2B**.

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais e familiares, à minha companheira de vida e a todos os meus amigos que estão comigo nessa jornada.

AGRADECIMENTO

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela minha vida e pelo dom do aprendizado . Além disso, dou toda minha gratidão aos meus pais, Íris e Marco, que me educaram, me ensinaram o que é certo e me mostraram que o caminho da vida é persistir mesmo nas maiores dificuldades. Agradeço ao meu irmão Henrique por me apoiar na minha jornada, ser meu amigo e por termos tido a oportunidade de ser colegas de equipe. Sou grato à minha companheira Letícia, que me inspira a melhorar mais a cada dia e me lembra de que sou capaz de realizar meus sonhos. Agradeço do fundo do meu coração à minha família e meus amigos, que sempre me dão forças e me dão suporte de todas as formas possíveis para que eu possa seguir. Por fim, a todos os meus professores que transmitiram de forma impecável seu conhecimento para mim, em especial a professora Elisângela Leal, por me orientar durante a Iniciação Científica e a professora Ana Maura Rocha, por me orientar na monitoria e na equipe 12 Bis, muitíssimo obrigado.

“São as nossas escolhas que mostram quem realmente somos, muito mais do que nossas habilidades”.

RESUMO

No desenvolvimento e uso da energia ao longo da história é importante para o desenvolvimento da tecnologia e da sociedade atual, além da preocupação com os impactos ambientais decorrentes do uso de energias não renováveis. Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias eficientes é ressaltado por este trabalho, especialmente no setor de transportes, cujo avanço tecnológico revolucionou os meios de transporte. O *software* Diesel-RK é uma ferramenta para calcular o desempenho de motores. O objetivo central deste estudo é realizar uma avaliação técnica do comportamento do etanol em um motor de combustão interna de ignição por centelha, utilizando o *software* Diesel-RK. No presente trabalho, inicialmente é feita a coleta de dados em referências bibliográficas. Com isso, as informações são inseridas no *software* e são feitas as variações de rotação do motor e fator Lambda. Então é consolidado o modelo de motor de combustão por centelha e feito a validação estatística do modelo com base na bibliografia. Após a etapa de validação, o estudo apresenta a simulação utilizando etanol como combustível e é feito a variação do tempo de ignição visando o ganho de desempenho com etanol. Por fim, o trabalho apresenta a análise dos resultados obtidos. Após a modelagem do motor, o trabalho apresenta como resultado uma precisão de 93,63%, 97,28% e 98,87% para a variação do fator lambda igual a 0,8, 1,0 e 1,2 respectivamente. Após isso, a pesquisa apresenta os resultados voltados para o desempenho do motor operando com etanol e suas possíveis melhorias, de forma que os valores mais expressivos são para o fator lambda igual a 1,2 tendo como ganho médio 21,22%, 20,37% e 21,22%, para a pressão média efetiva, potência e torque, respectivamente. O estudo conclui, analisando que, a melhor forma de se obter ganhos em um motor de combustão interna por centelha utilizando etanol como combustível é com um fator lambda igual a 1,2 e utilizando rotações em torno de 2000 RPM.

Palavras-chave: Energia. Motor de Combustão Interna. Etanol. Análise Técnica. *Software* Diesel RK.

ABSTRACT

The evolution of energy usage throughout history is important for the development of technology and society. Additionally, there is a notable concern for the environmental impacts resulting from the use of non-renewable energies. In this context, the development of efficient technologies is emphasized, particularly in the transportation sector, where technological advances have revolutionized means of transport. Diesel-RK is a tool used to assess engine performance. The central objective of this study is to conduct a technical evaluation of ethanol behavior in a spark-ignition internal combustion engine, using the Diesel-RK software. In this work, data is initially collected from bibliographic references, and this information is then input into the software, with variations in engine rotation and the Lambda factor. The spark-ignition engine model is then consolidated, and statistical validation is performed based on the literature. Following the validation step, the study shows simulations using ethanol as fuel, with variations in ignition timing aiming for improved performance. Finally, the paper analyzes the obtained results. After the engine modeling, the research reveals accuracy results of 93.63%, 97.28%, and 98.87% for lambda factor variations of 0.8, 1.0, and 1.2, respectively. Subsequently, the study focuses on the engine's performance operating with ethanol and potential improvements. The most significant values are observed for a lambda factor of 1.2, with an average gain of 21.22%, 20.37%, and 21.22% for indicated mean effective pressure, power, and torque, respectively. The study concludes by analyzing that the most effective way to achieve gains in a spark-ignition internal combustion engine using ethanol as fuel is with a lambda factor of 1.2 and engine speeds around 2000 RPM.

Keywords: Energy. Internal Combustion Engine. Ethanol. Technical Analysis. Diesel RK Software.

LISTA DE SÍMBOLOS

a - Número de átomos de carbono no combustível, adimensional.

AF - Relação Ar-Combustível real, adimensional.

AFs - Relação Ar-Combustível estequiométrico, adimensional.

b - Número de átomos de hidrogênio no combustível, adimensional.

D - Diâmetro do cilindro, m.

D θ - Duração da combustão, grau.

E_{Ent} - Energia que entra no sistema, J.

E_{Ext} - Energia que sai do sistema, J.

F - Razão de equivalência, adimensional.

F_w - Área atual de transferência de calor do gás para as paredes, m².

F_{Wcr} - Área de transferência de calor no canal, m².

Hu - Poder calorífico inferior, kJ/kg.

l - Comprimento da biela, m.

n - Rotação do virabrequim, RPM.

p - Pressão, Pa.

p_r - Pressão do gás no coletor de escape, Pa.

Q_w - Quantidade de calor dissipada nas paredes, W.

Q_x - Quantidade de calor fornecida ao fluido de trabalho por uma fonte externa, W.

R - Constante de gás, J/mol.K.

R_u - Constante universal dos gases, J/mol.K.

S - Curso do motor, m.

T - Temperatura do gás no cilindro, K.

T_a - Temperatura do cilindro no início da compressão, K.

T_i - Temperatura de entrada, K.

T_w - Temperatura da superfície receptora de calor, K.

T_{Wcr} - Temperatura da parede do canal, K.

U - Energia interna, J.

U_p - Velocidade do pistão, m/s.

V - Volume do cilindro, m^3 .

V_a - Volume do cilindro no início da compressão, m^3 .

V_c - Volume de folga, m^3 .

V_d - Volume de deslocamento, m^3 .

V_h - Volume de trabalho do cilindro, m^3 .

W - Velocidade e suas componentes nos eixos x, y, z, m/s.

w - Velocidade média do gás no cilindro, m/s.

W - Velocidade do gás durante o processo de admissão e compressão, m/s.

W_0 - Velocidade do fluxo estacionário, m/s.

W_1 - Velocidade no final do canal no início do intervalo de cálculo, e l_{cr} é o comprimento do canal, m/s.

W_{cr} - Coeficiente de transferência de calor do gás para as paredes do canal, $W/m^2.K$.

W_L - Velocidade no final do canal no final do intervalo de cálculo, m/s.

X - Distância a partir do ponto morto superior, m.

x - Fração de massa, adimensional.

x_b - Fração queimada do combustível, adimensional.

y - Fração molar, adimensional.

y_s - Início da combustão ou adição de calor, grau.

μ_f - Área da seção transversal efetiva neste passo de cálculo, m^2 .

ρ - Densidade do gás no cilindro, kg/m^3 .

p_a - Pressão do cilindro no início da compressão, Pa.

C_m - Velocidade média do pistão, m/s.

λ - Valor da relação Ar-Combustível, adimensional.

$\Delta\phi$ - Passo de cálculo no ângulo de rotação do virabrequim, grau.

$\Delta\tau$ - Passo de cálculo no tempo, grau.

$\Delta E_{sistema}$ - Variação de energia no sistema, J.

$\int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV$ - Trabalho mecânico realizado pelo fluido de trabalho, J.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Jovem abastecendo o carro no posto de gasolina, uma ilustração vetorial.	10
Figura 2: Diagramas p-V e T-s do ciclo Diesel ideal.	11
Figura 3: Diagramas p-V e T-s do ciclo ideal de Otto.	15
Figura 4: Vista dos componentes de um motor de combustão interna.	16
Figura 5: Coeficientes para as capacidades térmicas específicas das espécies dependentes da temperatura (I) T1000. and (II) 1000T3200.	19
Figura 6: Ilustração do cilindro-pistão de um motor de combustão interna.	24
Figura 7: Diagrama p- para uma combustão normal.	25
Figura 8: Esquema da destilação atmosférica e a vácuo [A].	27
Figura 9: Esquema simplificado de produção do etanol.	30
Figura 10: Impacto da alumina no consumo de combustível em motores a etanol e gasolina.	31
Figura 11: Impacto da alumina na emissão de monóxido de carbono em motor a etanol-gasolina.	32
Figura 12: Fluxograma dos procedimentos da pesquisa.	40
Figura 13: Fluxograma da Base Teórica de Estudo.	40
Figura 14: Tela de configuração 1 do Diesel RK.	41
Figura 15: Tela de configuração 2 do Diesel RK.	42
Figura 16: Tela de configuração 3 do Diesel RK.	42
Figura 17: Tela de configuração 4 do Diesel RK.	43
Figura 18: Tela de configuração 5 do Diesel RK.	43
Figura 19: Fluxograma dos procedimentos da simulação no software Diesel RK.	44
Figura 20: Resultados da simulação mostrando pressão média efetiva - BMEP (a), potência (b) e torque (c) em relação à rotação (rpm) do motor, com gasolina como combustível.	51
Figura 21: Pressão efetiva média do freio versus rotação do motor em diversas relações de equivalência usando ar e modelos de calor específicos da mistura.	52
Figura 22: Resultados da simulação mostrando pressão média efetiva - BMEP (a), potência (b) e torque (c) em relação à rotação (rpm) do motor, com etanol como combustível.	55
Figura 23: Ganho de BMEP pela Relação Ar-Combustível variando o tempo de ignição.	60
Figura 24: Ganho de BMEP pelo fator Lambda.	60
Figura 25: Ganho de Potência pela Relação Ar-Combustível variando o tempo de ignição.	61
Figura 26: Ganho de Potência pelo fator Lambda.	61
Figura 27: Ganho de Torque pela Relação Ar-Combustível variando o tempo de ignição.	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Propriedades Combustíveis do Etanol e da Gasolina.	27
TABELA 2 - Variáveis e indicadores deste trabalho.	41
TABELA 3 - Especificações operacionais e de motor usadas na simulação.	43
TABELA 4 - Variáveis de modelagem do motor.	44
TABELA 5 - Parâmetros operacionais do motor SI utilizados na simulação.	45
TABELA 6 - Cálculo da precisão média para Lambda igual a 0,8; 1,0 e 1,2.	48
TABELA 7 - Propriedades do etanol.	49
TABELA 8 - Ganho da Pressão média efetiva [bar] variando o tempo de ignição com etanol como combustível.	52
TABELA 9 - Ganho de Potência [kW] variando o tempo de ignição com etanol como combustível.	53
TABELA 10 - Ganho de Torque [N.m] variando o tempo de ignição com etanol como combustível.	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Formulação do Problema	1
1.2 Justificativa	5
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Geral	6
1.3.2 Específicos	6
1.4 Estrutura do Trabalho	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1 Energia	8
2.2 Motor de Combustão Interna	10
2.3 Combustíveis	26
2.4 Etanol	29
2.5 Análise Técnica	33
2.6 Software Diesel RK	35
2.7 Considerações Finais	35
3 METODOLOGIA	36
3.1 Tipos de pesquisa	36
3.2 Materiais e Métodos	39
3.3 Variáveis e Indicadores	44
3.4 Instrumento e Coleta de Dados	45
3.5 Tabulação de Dados	46
3.6 Considerações Finais do Capítulo	46
4 RESULTADOS	47
4.1 Validação do Modelo do Motor	47
4.2 Simulação do Motor Monocilindro com o uso de etanol	54
4.2.1 Variação dos parâmetros do motor com o etanol como combustível	56
5 CONCLUSÃO	63
5.1 Conclusão do Trabalho	63
5.2 Trabalhos Futuros	63
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	64

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, o tema selecionado para o trabalho de conclusão de curso é apresentado de forma a explicitar e facilitar o entendimento dos principais pontos no assunto, definindo o problema que motiva esta pesquisa. Além disso, o texto segue com a formulação do problema, a justificativa, os objetivos da pesquisa e a estrutura geral do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

Desde os primórdios da humanidade, a energia vem sendo utilizada de diversas maneiras, realizando todo o trabalho que se torna uma necessidade. Segundo Çengel (2013,p.51), “a qualidade de vida, e até mesmo sua manutenção, dependem da disponibilidade de energia”.

Segundo Rosa (2014), ao longo das eras, a energia tem sido cada vez mais consumida de diferentes formas, e tendo diversas aplicações, já que nos tempos atuais, ela é utilizada não somente de fontes mecânicas, mas também de fontes térmicas, elétricas e nucleares. Além disso, Donato (2012) afirma que, se isso fosse possível, o ser humano teve de inventar vários meios de transformar, armazenar e transportar esse recurso, tal como o motor.

Outrossim Çengel (2013) completa que, com o passar dos anos, a energia se tornou algo imprescindível no dia a dia da sociedade, de tal forma que o uso de energias não renováveis pode trazer malefícios ao meio ambiente. Com isso Rosa (2014) afirma que, as matrizes energéticas tendem a ser convertidas para um meio não agressivo ao ambiente.

Contudo, nota-se que, no ano de 2011 a parcela que corresponde às energias renováveis ainda era muito baixa, sendo esta de 15,9% (ROSA, 2014). Dessa forma, um modo de atingir um dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) proposto pela ONU (2023) é a popularização dos biocombustíveis.

Contudo, de acordo com Chapra (2016), muitas tecnologias ainda precisam ser desenvolvidas para que a produção de energia seja completamente otimizada e eficiente utilizando matrizes energéticas renováveis. De modo que Chapra (2016) propõe que os estudos partindo de análises técnicas são a base para o aprimoramento de novos modelos de sistemas mecânicos que auxiliam e melhoram o uso de energia.

Um dos meios para proceder com as análises é o método numérico usando simulações, onde os *softwares* disponibilizam uma vasta gama de ferramentas que podem ser utilizadas para aproximar o estudo computacional da realidade, tal como Chapra (2016, p.20) explica sobre os métodos computacionais:

Os métodos numéricos são técnicas pelas quais os problemas matemáticos são formulados de modo que possam ser resolvidos com operações aritméticas. [...]Não é nada surpreendente que, com o desenvolvimento de computadores digitais rápidos e eficientes, o papel dos métodos numéricos na resolução de problemas de engenharia tenha aumentado drasticamente nos últimos anos.

Brunetti (2018) contextualiza que no século XIX a humanidade teve uma de suas maiores invenções realizadas, sendo este o motor de combustão interna, o qual realiza o processo de queima do combustível dentro da própria estrutura do motor. Oliveira (2018) reforça que, em 1860, Étienne Lenoir desenvolveu o primeiro motor a combustão interna do mundo, que produzia até 1 HP. De acordo com Brunetti (2018, p.21) “As máquinas térmicas são dispositivos que permitem transformar calor em trabalho. O calor pode ser obtido de diferentes fontes: combustão, energia elétrica, energia atômica, etc”.

Além disso Leal (2022) cita que, durante as décadas seguintes, muito foi desenvolvido sobre essa área tendo como os principais nomes de referência Nikolaus August Otto e Rudolf Diesel, com isso, os dois principais ciclos de funcionamento foram estabelecidos.

Ademais Brunetti (2018) afirma que, o avanço tecnológico permitiu que o ser humano fizesse muitas otimizações nos meios de transporte, tanto para os veículos cargueiros quanto para os de transporte humano, uma vez que por esse avanço houve um aumento significativo da potência gerada pelos motores de combustão interna.

Oliveira (2018) confirma que, essa melhoria se deve muito ao desenvolvimento de combustíveis cada vez mais refinados e eficientes para as máquinas térmicas, como por exemplo, a gasolina. Isso é fundamentado, visto que em 2007, os veículos automobilísticos e aeronáuticos consumiram aproximadamente 4,9 bilhões de barris de diversos derivados do petróleo (TURNES, 2013).

Por outro lado, Turns (2013) contrapõe que, quando observa-se as questões ambientais, os combustíveis fósseis são agravantes para a poluição da atmosfera. Um dos possíveis modos de reduzir essa agressão à natureza é a disseminação do etanol como fonte de energia para motores de combustão interna.

Norton (2010) sustenta que, o desenvolvimento de tecnologias e ferramentas voltadas para o ramo automobilístico tem sido cada vez mais explorado pelas indústrias a fim de criar veículos mais potentes, velozes e que tenham menor consumo de combustível. Com isso, o estudo dos diversos mecanismos que compõem o motor de combustão interna é indispensável para tais melhorias. Norton (2010, p.107), reforça que:

Muitas práticas de projeto em engenharia envolvem uma combinação de síntese e análise. Muitas áreas da engenharia lidam primeiro com análises técnicas para várias situações. Contudo, um engenheiro não pode analisar nada até que seja sintetizado na realidade. Muitos problemas de projeto de máquinas requerem a criação de mecanismos com características de movimentos particulares.

Além disso, Kuleshov (2011) mostra que, os estudos sobre o desempenho termodinâmico, o sistema de injeção e o coletor, tem direta relação com esses avanços tecnológicos. Um dos métodos que é utilizado comumente para o estudo desses principais tópicos é a simulação numérica, através de *softwares*, como afirma Kuleshov (2011).

Ramos (2019) propõe que, conforme os motores de combustão interna foram se popularizando ao longo dos anos, criou-se uma dependência da matéria prima utilizada para a produção de combustível. Para Ramos (2019) o petróleo, além de ser caro para ser extraído, essa matéria prima é muito escassa na natureza, e a produção de combustível a partir dela, dá de retorno um produto que quando queimado se torna altamente poluente ao meio ambiente.

Contudo, Ramos (2019) explica que, em 1860, Otto já utilizava em alguns de seus experimentos o etanol como combustível. Além disso, segundo Ramos (2019), o biocombustível volta a ter real importância no mundo durante as guerras mundiais do século XX, já que naquele período o etanol era mais facilmente produzido que o petróleo a ser extraído. Todavia, esse biocombustível apenas conseguiu espaço no mercado brasileiro no início dos anos 2000, com os motores adaptados para *flex fuel*. Isso se devia à baixa eficiência na queima do etanol, que quando misturado com a gasolina, se tornava viável usualmente (RAMOS, 2019).

Atualmente, o etanol vem sendo estudado em várias partes do mundo, com o intuito de ser utilizado como combustível único de um veículo e de forma que tenha uma eficiência razoável. Segundo Cortez (2016, p.51),

Embora o país tenha logrado importantes sucessos na viabilização do uso do etanol combustível, seja em mistura com a gasolina ou como combustível propriamente dito, existem ainda muitos desafios a vencer na área de

motores, que deve passar por mudanças com o Inovar Auto, incluindo o aumento na eficiência do uso do etanol em relação à gasolina nos veículos *flex* com a entrada no mercado dos veículos híbridos.

Por esse motivo, inúmeras técnicas de análises têm sido implementadas. Para que o desenvolvimento tecnológico tenha continuidade nos dias atuais, apenas recursos tradicionais não são suficientes, e cada vez mais o ser humano se torna mais ligado ao poder de processamento dos computadores, que dão a possibilidade de fazer simulações e executam inúmeros cálculos complexos em um curto período de tempo, como afirma Delgado (2017, p.3) "ele consegue fazê-lo de forma mais rápida, mais confiável e com maiores capacidades de processamento e de memória. Na prática, o que um computador faz é simular o comportamento de uma ou mais pessoas".

Para Delgado (2017), esses métodos de análise são cada vez mais comuns em grandes indústrias e pesquisas acadêmicas, já que programas como *Ansys*, *SolidWorks* e *Diesel RK*, permitem a modelagem que se adequa aos dois ambientes de desenvolvimento tecnológico.

Dito isso, Coelho (2016) afirma que, um dos principais fatores que se pode considerar para uma análise técnica é a eficiência termodinâmica, que exalta nitidamente quanto de calor está sendo aproveitado e convertido em trabalho. Coelho (2016) enfatiza que, a Segunda Lei da termodinâmica dita como as máquinas térmicas tendem a funcionar, o que significa que as eficiências e ciclos atreladas a esses equipamentos também obedeçam à essa lei.

Ademais Brunetti (2018) sustenta que, outro ponto importante para o desenvolvimento nos motores movidos a etanol é o próprio sistema de injeção/coletor, que é responsável pela entrada do combustível nas câmaras, de forma a fazê-lo entrar com a maior homogeneização e menor turbulência possível, o que facilita a queima dos gases. Além disso, Brunetti (2018, p.445), complementa que "O dimensionamento do sistema está diretamente relacionado com o comportamento do motor, assim a ferramenta a ser utilizada deve permitir que seja variada a qualidade da mistura para cada condição de rotação (n) e da posição (α) da borboleta aceleradora".

Dentre os diversos meios de análise computacional, um dos *softwares* mais utilizados para simulações 1D é o *Diesel RK*. Esse programa tem como principais aplicações a previsão e otimização do consumo de combustível, análise e otimização de combustão e emissões, otimização do tempo da válvula de combustível, análise e otimização do sistema EGR (recirculação de gases de exaustão), análise de motor à biocombustível, pesquisa e otimização

do perfil de injeção de combustível, incluindo injeção múltipla, projeto e localização do pulverizador, bem como otimização do formato do pistão. Em vista do que foi discutido anteriormente, a questão a ser solucionada é:

Como analisar o desempenho de um motor de combustão interna por centelha abastecido a etanol usando o *software* Diesel RK?

1.2 Justificativa

Como abordado no último tópico, o combustível produzido por fontes fósseis, apesar de muito eficiente, tem a desvantagem de ser escasso, uma vez que a extração do petróleo é muito maior do que a quantidade que o planeta consegue produzir. Além disso, a sua extração depende da região do globo, pois a formação do petróleo está atrelada às bacias sedimentares, juntamente com o acúmulo de matéria orgânica, como reforça Farah (2012, p.7) “a exploração de petróleo é uma atividade dispendiosa e demorada para apresentar resultados, e envolve o levantamento de dados, estudos sísmicos e análises dos dados, em que se verifica a possibilidade de uma bacia sedimentar acumular petróleo”. Ademais, a queima do álcool reduz significativamente a emissão de gases poluentes na atmosfera (FARAH, 2012).

Santos (2013) explica que, em 2012 no Rio de Janeiro, durante a Conferência das Nações Unidas, foram implementados 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável para o futuro, com o intuito de tornar o futuro mais próspero para a humanidade. Uma dessas metas para o futuro, se trata de a humanidade ter acesso de forma limpa e renovável à energia.

Santos (2013, p.76), afirma que, “Ao longo da história, os câmbios energéticos foram condicionados por privações, escassez de matéria-prima, restrições ao acesso às fontes, bem como pelo dismantelamento das estruturas energéticas anteriores.”, portanto, o etanol se estabelece como uma potencial fonte de energia para substituir a gasolina.

Portanto, Santos (2013) conclui que, com esses aspectos ressaltados, nota-se uma grande necessidade de tornar o etanol um combustível tão eficiente quanto os de origem fóssil no motor de combustão interna. Para isso, Santos (2013) afirma que a análise técnica se torna indispensável, visto que parâmetros como a eficiência termodinâmica e o sistema de injeção/coletor possam ser estudados, a fim de melhorar o desempenho dessa máquina térmica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Avaliar tecnicamente, com o uso do *software Diesel-RK*, o comportamento do etanol em um motor de combustão interna de ignição por centelha, com vistas ao ganho de desempenho.

1.3.2 Específicos

- Realizar revisão bibliográfica sobre energia, motores de combustão interna por centelha, combustíveis e etanol;
- Descrever a metodologia adotada, apresentar as variáveis e os indicadores de estudo e demonstrar a instrumentação de coleta e tabulação dos dados obtidos;
- Simular computacionalmente o uso etanol como combustível em motor de combustão interna por centelha;
- Analisar os parâmetros de operação (pressão média efetiva, potência e torque);
- Realizar sugestões de trabalhos futuros;

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho de conclusão de curso é composto por cinco capítulos, o primeiro se baseia na introdução dos assuntos abordados ao longo do estudo, tendo em vista a formulação do problema e da pergunta problema, justificativa do trabalho, e os objetivos gerais e específicos da pesquisa.

O segundo capítulo tem o intuito de fundamentar o estudo feito, com revisões bibliográficas, abordando toda a temática do problema e referenciando os principais autores dos assuntos, energia, motores de combustão interna, etanol e análise técnica utilizando o *software Diesel RK*.

No terceiro capítulo, é explicitada de forma clara a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa, a fim de demonstrar como os resultados são obtidos em uma simulação de um motor de combustão interna por ignição por centelha.

Ademais, o quarto capítulo mostra os resultados e discussão dos mesmos obtidos pelo uso do *software Diesel RK*, com o intuito de justificar a relevância destes para a presente pesquisa.

Por fim, o quinto capítulo mostra a conclusão do trabalho, demonstrando os pontos mais importantes que influenciaram na injeção de combustível e no desempenho termodinâmico do motor a combustão interna por ignição, utilizando etanol como combustível, além de sugerir propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada a fundamentação teórica do trabalho de conclusão de curso, com o objetivo de consolidar a ideia que sustenta o desenvolvimento de um método capaz de aumentar o desempenho de um motor de combustão interna, utilizando etanol como combustível.

2.1 Energia

Moreira (2021) explica que, desde o início da história da humanidade, a energia vem sendo utilizada para diversos fins, sejam eles, para cozinhar, locomover ou até mesmo como meio de proteção. Além disso, as fontes utilizadas ao longo dos anos foram sendo refinadas a fim de cada vez mais, obter-se maior eficiência em seu uso. No começo do século XIX, com as revoluções industriais, a humanidade fez diversos avanços que permitiram o desenvolvimento de máquinas que permitiram o melhor uso da energia e de novos meios de transformá-la.

Segundo Smith (2019), atualmente, a principal forma de energia utilizada é a elétrica, visto que sua aplicação é ampla e é facilmente transformada em outros tipos de energia. Esse consumo se dá pela popularização de aparelhos como eletrodomésticos, computadores, celulares e ferramentas, que dependem de tal fonte. Moreira (2021, p.ix), reforça que,

No final do século XIX, foi desenvolvida a lâmpada incandescente por Thomas Edson. Na famosa guerra entre corrente contínua defendida por Edson e a alternada defendida por Tesla, a energia elétrica em corrente alternada se impôs como forma mais eficiente de gerar, transmitir e distribuir energia elétrica, principalmente após a invenção dos geradores e transformadores.

Segundo Smith (2019, p.1), “a conservação implica na transformação de uma forma de energia em outra”, esse princípio também descreve o modo com que a energia se apresenta no universo.

Além disso, Çengel (2013) ressalta que o princípio da conservação da energia pode ser formulado pela Equação (1), na qual a variação líquida (aumento ou diminuição) da energia total do sistema durante um processo é igual à diferença entre a energia total que entra e a energia total que sai do sistema durante esse processo.

$$E_{Ent} - E_{Sai} = \Delta E_{sistema} \quad (1)$$

Tendo esse conceito em mente Hinrichs (2014), sustenta que ao longo da história da humanidade, esse conceito foi adequado para diversas situações, visto que o método de obtenção de energia foi alterado ao longo do tempo. De acordo com Filippo (2014), pode-se interpretar também que a energia é a capacidade que alguns materiais têm de realizar uma tarefa útil.

Dessa forma, Hinrichs (2014) apresenta alguns exemplos de materiais como, a água em uma usina hidrelétrica, o isótopo do urânio em uma usina nuclear, hidrogênio em uma célula combustível ou até mesmo combustível em um automóvel.

Dito isso, para Filippo (2014), o meio que transforma energia é sempre um mecanismo que deve ter o maior aproveitamento possível durante esse processo para que seja menos necessário a injeção de mais energia em outras formas.

Segundo Philippi (2016), a energia nunca é totalmente aproveitada, ou seja, sempre haverá perdas em um processo de transformação, seja em calor, vibração ou outro produto resultante do processo. Como reforça Filippo (2014, p.61) “a eficiência de um dispositivo térmico é uma relação entre o que se obtém de energia útil pelo que é gasto para obtê-la”.

De acordo com Filippo (2014) o trabalho realizado, por sua vez, também é um tipo de energia, que se apresenta em uma forma mais usual para a humanidade, como energia mecânica, elétrica e térmica. Além disso, Philippi (2016) sustenta que, outro modo de entendimento que se tem de energia é a potência gerada em um processo.

Isso implica que, de uma fonte de energia primária até o destino final, que é seu uso, pode haver diversos processos de transformação, apesar de que a cada novo processo, se tem mais perdas energéticas. Segundo Philippi (2016, p.27),

Existem vários processos de conversão de energia, e os rendimentos de cada um deles são bem diversos. Eles podem variar de alguns pontos percentuais até rendimentos de mais de 90%. A energia não utilizada no processo, ou seja, perdida na cadeia de transformação, usualmente recebe o nome de perdas (energéticas). Assim, em um sistema com rendimento de

90%, as perdas representaram 10% do valor da energia total fornecida ao sistema.

De acordo com Moran e Shapiro *apud* Both (2018, p.123) que, “exergia é o trabalho máximo que pode ser obtido pelo processo mais adequado de um sistema, que se encontra em um estado inicial, até que atinja o estado final, caracterizado pelo equilíbrio termodinâmico com o ambiente”. Segue como exemplo na Figura 1, um motor de um veículo que é abastecido com combustível, e além de gerar a energia mecânica que será utilizada (exergia), ou seja, a qualidade da energia, produz também a energia que não ser utilizada, tais como o calor, o som e o movimento nos demais componentes do carro.

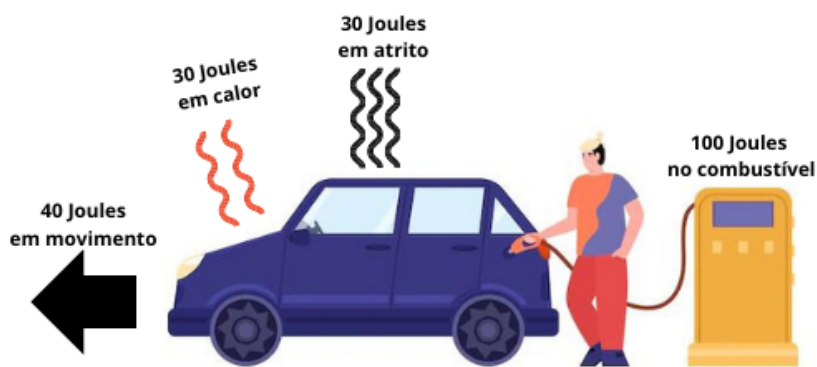


Figura 1: Jovem abastecendo o carro no posto de gasolina, uma ilustração vetorial.
Fonte: Adaptada de rumka_vodki (2023).

Outro meio de se observar a energia que não pode ser aproveitada em um processo, é pelo conceito de trabalho da vizinhança. Contudo, existe também o conceito de entropia, que está atrelado à energia e representa a quantidade de exergia que não pode ser aproveitada em um processo devido às perdas que não são possíveis de recuperar. Ademais, a potência de um mecanismo pode ser definida como a quantidade de energia em Watts de potência ou Joules por segundo que determinado processo consegue converter.

2.2 Motor de Combustão Interna

Em meados do século XIX, alguns anos após o fim da primeira Revolução Industrial, o engenheiro alemão, Nikolaus Otto desenvolveu um ciclo de funcionamento para motores a base de benzeno, que faziam combustão interna. Segundo Leal(2022, p.2),

Apresentado pela primeira vez na Exposição Industrial de Paris, em 1867, o motor concebido por Nikolaus Otto e Eugen Langen, Figura 4.2, tinha características bem melhores de desempenho. O conceito desse motor era o de “pistão livre”, impulsionado pela explosão dos gases no cilindro, o pistão estava ligado a um volante através de uma cremalheira e uma engrenagem. No retorno do pistão, produzia-se trabalho mecânico.

Leal (2022) constata que, já no final do mesmo século, surgiu um outro modelo de motor de combustão interna, desenvolvido pelo franco-alemão Rudolf Diesel, que funcionava com o óleo derivado do amendoim. Além disso, Diesel apresentou ao mundo em 1893 o primeiro veículo movido por um motor de combustão interna. Ao longo dos anos com o desenvolvimento da tecnologia dos motores de combustão interna, esse mecanismo foi sendo aplicado para outras finalidade e outros meios de transporte, tais como, navios, motocicletas, locomotivas e motores para produção de energia elétrica.

Para Teixeira (2018), ao passar dos anos, foram estabelecidos os dois principais ciclos de combustão, que são comumente implementados nos veículos. Pode-se observar na Figura 2 o ciclo de funcionamento do motor a diesel.

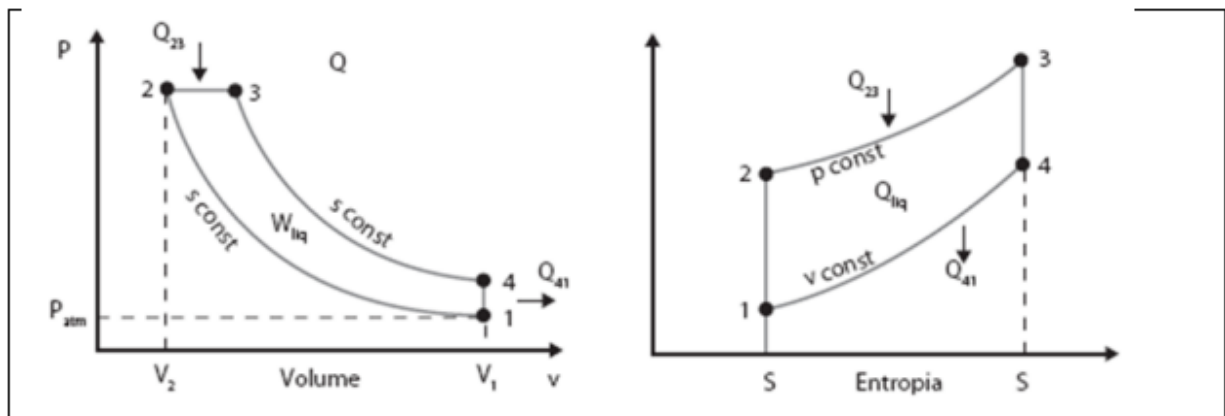


Figura 2: Diagramas p-V e T-s do ciclo Diesel ideal.
Fonte: Filippo (2014).

Por outro lado, Teixeira (2018) contextualiza que, o motor de combustão interna de Nikolaus Otto, inicialmente estabelecia seu funcionamento utilizando gás como combustível, anos depois a gasolina foi utilizada no motor Otto.

Brunetti estabelece que para determinar a potência disponível no eixo do motor, também conhecida como potência efetiva ou útil representada por (N) , basta utilizar a equação (2), onde (n) é a rotação do motor e (T_q) é o torque do motor.

$$N = \frac{2\pi n T_q}{60} \quad (2)$$

Bauer (2012) argumenta que o torque (T_q), é definido pela relação entre o raio de aplicação da força l e a força (F) aplicada ao pistão, como mostra a equação (3).

$$T_q = l \cdot F \quad (3)$$

Segundo Leal (2022), esse modelo de motor tem o volume do cilindro calculado pela relação entre o diâmetro (D) do cilindro e o curso (S), como mostra a Equação (4):

$$V_{du} = \frac{\pi D^2}{4} S \quad (4)$$

E a cilindrada do motor é a multiplicação da cilindrada unitária V_{du} pelo número de cilindros no motor (z), como mostra a equação (5).

$$V_d = \frac{\pi D^2}{4} S \cdot z \quad (5)$$

Brunetti (2018) mostra que a relação de compressão pode ser dada pela razão da cilindrada unitária e o volume da câmara de combustão pelo próprio volume da câmara de combustão, como mostra a equação (6).

$$RC = \frac{V_{du} + v_{cc}}{v_{cc}} \quad (6)$$

Dessa forma, Teixeira (2018) argumenta que, o ciclo do motor é composto por quatro tempos, nos quais, primeiramente ocorre a compressão adiabática, onde ocorre a sucção da mistura ar-combustível para o interior do cilindro e ocorre a compressão sem troca de calor.

Brunetti (2018) explica que, em seguida, acontece o processo de aquecimento isocórico de calor, ou seja, ocorre a ignição da mistura e o combustível é aquecido sem alteração de volume.

Logo, ocorre o processo de expansão adiabática, onde o gás é expandido, reduzindo a temperatura e pressão interna do cilindro e por fim, acontece o processo de rejeição isocórica de calor, onde o gás é expulso do volume de controle, a volume constante (TEIXEIRA, 2018).

Leal (2022) mostra que os processos isentrópicos podem ser representados utilizando as relações termodinâmicas, que levam em consideração Pressão (P_n), Volume (V_n) e Temperatura (T_n), onde n indica o estágio que se encontra o processo de funcionamento do motor, nas seguintes equações (7), (8), (9) e (10).

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \quad (7)$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k \quad (8)$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{k-1} \quad (9)$$

$$\frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^k \quad (10)$$

Teixeira (2018) mostra que, partindo da primeira Lei da Termodinâmica, desprezando as variações de energia potencial e cinética, tem-se para a descrição matemática do processo de um motor SI dentro do cilindro conforme mostra a equação (11).

$$q = u_{sai} - u_{entra} \quad (11)$$

Brunetti (2018) afirma que o processo de adição de calor a volume constante no sistema pode ser representado pela equação (12), em que u_n é a energia interna do sistema em

cada estágio, C_v é o calor específico médio entre /as temperaturas do processo a volume constante, e T_n é a temperatura do sistema em cada estágio:

$$q_{23} = u_3 - u_2 = C_v (T_3 - T_2) \quad (12)$$

Leal (2022) mostra que, pode-se obter a pressão média efetiva (pme), pela relação entre a variação do volume específico do gás e o trabalho líquido específico, como mostra a equação (13).

$$pme = \frac{w_{liq}}{v_1 - v_2} \quad (13)$$

Teixeira (2018), mostra que assumindo o fluido de trabalho como um gás perfeito, a equação (14) pode ser empregada nos processos para determinar as propriedades termodinâmicas, relacionando Pressão (P), volume específico (v), temperatura (T) e a constante universal dos gases (R_g).

$$Pv = R_g T \quad (14)$$

Brunetti (2018) constata que no ciclo termodinâmico de Otto, o trabalho do sistema pode ser calculado pela diferença entre o trabalho de expansão (W_{exp}) e o trabalho de compressão (W_{comp}).

$$W_{ciclo} = W_{exp} - W_{comp} \quad (15)$$

Em que Leal (2022), mostra que o trabalho de expansão é a relação entre a variação da temperatura no estágio 3-4, o calor específico médio a volume constante (C_v) e a massa do gás (m), como mostra a equação (16).

$$W_{exp} = mC_v (T_3 - T_4) \quad (16)$$

Além disso Teixeira (2018) completa que, o trabalho de compressão é a relação entre a variação da temperatura no estágio 1-2, o calor específico média a volume constante C_v e a massa do gás m , como mostra a equação (17).

$$W_{comp} = mC_v(T_2 - T_1) \quad (17)$$

A Figura 3 ilustra o funcionamento de um motor de combustão interna de ignição por centelha, e pode-se observar os diagramas P-v e T-s referentes a esses processos térmicos (LEAL,2022).

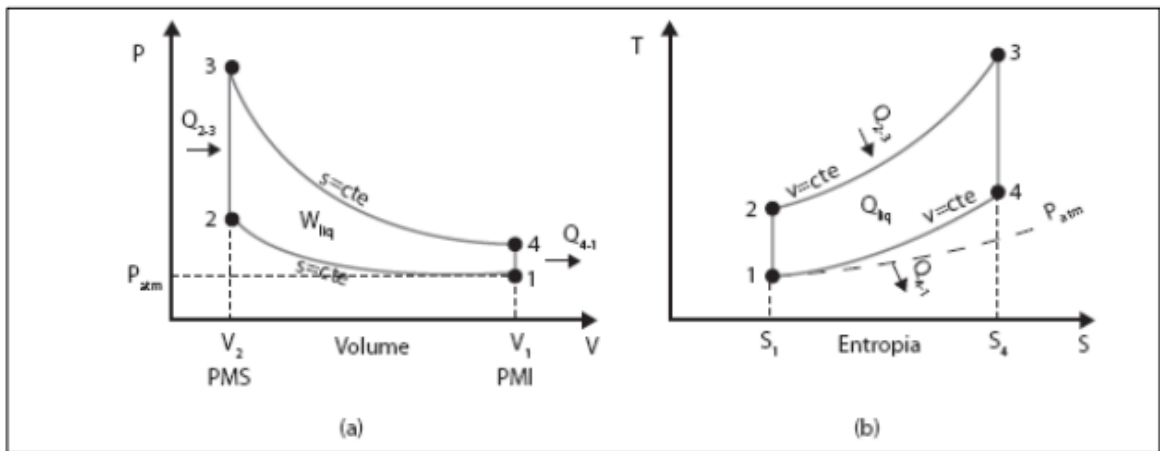
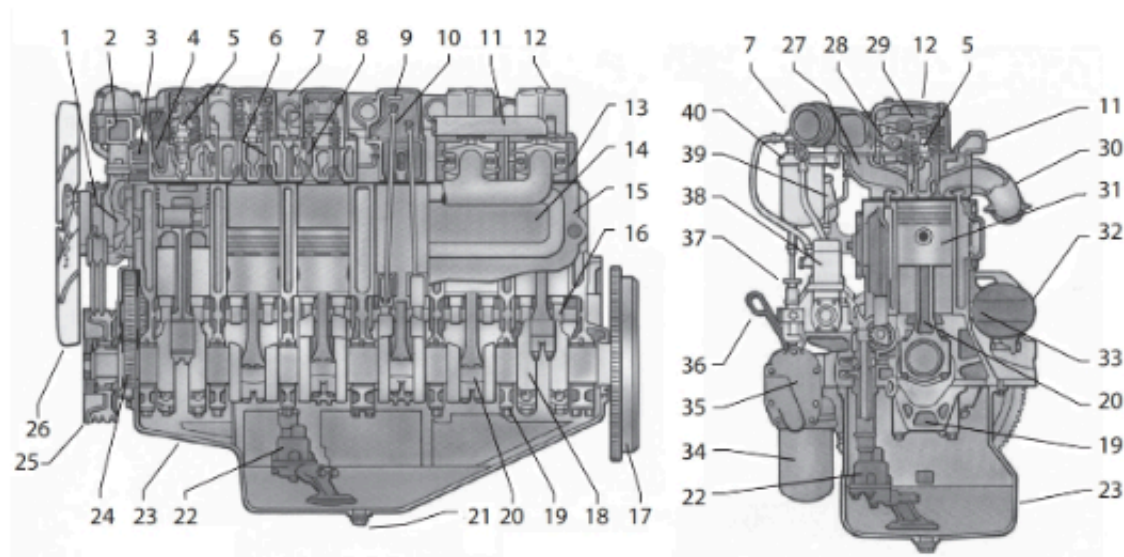


Figura 3: Diagramas p-V e T-s do ciclo ideal de Otto.
Fonte: Leal (2022).

Segundo Brunetti (2018), o motor de combustão interna é uma construção de vários mecanismos incorporados de forma que a transformação de energia química em energia mecânica seja possível. Na Figura 4 vê-se as principais peças que compõem o motor de combustão interna.



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

Figura 4: Vista dos componentes de um motor de combustão interna.
Fonte: Brunetti (2018).

Kuleshov (2011) propõe que, no interior do cilindro, devido à sua compacidade, não se leva em consideração a diferença de pressão em relação ao volume, ou seja, utiliza-se uma formulação de dimensão zero (D0). Esse pressuposto por Kuleshov (2011), simplifica significativamente o cálculo, sem introduzir erros perceptíveis nos resultados.

No contexto termodinâmico para Brunetti (2018), o cilindro é considerado uma espécie de sistema termodinâmico aberto ou uma combinação de vários sistemas termodinâmicos. Kuleshov (2011) não leva em conta o campo de velocidades; a pressão e a temperatura dentro de cada sistema termodinâmico são consideradas variáveis independentes das coordenadas, dependendo apenas do tempo, ou seja, do ângulo de rotação do virabrequim.

Woschni (1970) afirma que o cálculo da transferência de calor para as paredes não exige uma grande capacidade computacional. Essa quantidade de calor é calculada usando a equação de Newton-Richmann, como mostrado na equação (18)

$$dQ_w = \alpha_w F_w (T - T_w) \Delta\tau \quad (18)$$

Para Kuleshov (2011), na atualidade, o cálculo da combustão representa a etapa mais difícil e, ao mesmo tempo, a parte mais significativa na modelagem matemática de motores de combustão interna, particularmente no que tange às questões ambientais. Kuleshov (2011) denota que, seu propósito primordial é aferir a quantidade de calor liberada em cada etapa como mostra a equação (19):

$$Q_{in} = g_c H_u \frac{dx}{d\phi} \Delta\phi \quad (19)$$

Mizernuk (1986) relata que, os parâmetros do gás em motores de combustão interna são descritos por equações diferenciais de conservação de massa e energia, bem como pela equação de estado que são resolvidos principalmente pelos métodos de Euler e de Runge-Kutta de quarta ordem e respectivamente o primeiro método requer o uso de pequenos intervalos de cálculo, enquanto o segundo envolve a resolução das equações em quatro passos de cálculo relativamente extensos.

A fórmula que Woschni (1970) propõe é a abordagem mais comum para avaliar a troca de calor no cilindro do motor, uma vez que leva em consideração as variações na troca de calor em diferentes ângulos de virabrequim durante o ciclo de trabalho.

Além disso, de acordo com pesquisas de Rosenblith (1977) e Petrichenko (1979), essa fórmula considera a contribuição da radiação térmica, que pode corresponder a até 30% do fluxo de calor total.

Pavlichenko (1975) e Zhukov (1976) conduziram a validação experimental que confirmou a maior precisão da fórmula de Woschni em comparação com outras alternativas disponíveis, além de também fornecem recomendações para ajustar o fator na fórmula de

Woschni: ele pode ser aumentado para 135 em motores de alta rotação e reduzido para 85 em motores de baixa rotação.

$$\alpha_w = 110 \frac{p^{0,8} W^{0,8}}{T^{0,53} D^{0,2}} \quad (20)$$

Segundo Kuleshov (2011) a temperatura média da parede do fundo do pistão é determinada ao resolver o problema de condução de calor em uma parede composta. Kuleshov (2011) afirma que isso requer o conhecimento da condutividade térmica média do material e da espessura do fundo do pistão (D), bem como os parâmetros da condutividade térmica (H) e a espessura (DH) da casca de fundição e a área relativa da superfície resfriada na cabeça do cilindro, no caso de sistemas de resfriamento a ar, de modo que a temperatura da superfície térmica é calculada usando a seguinte equação:

$$T_w = \frac{(\alpha_w \cdot T)_{cp} + T_{oxl} \cdot k_t}{k + \alpha_w \cdot cp} \quad (21)$$

$$k_t = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{woxi}} + \frac{\Delta}{\lambda} + \frac{\Delta_H}{\lambda_H}} \quad (22)$$

Abu-Nada (2007) afirma que em motores de ignição por centelha, os produtos da combustão apresentam calores específicos dependentes da temperatura, em que produtos de combustão mais comuns são (CO₂), (CO), (H₂O), (N₂), (O₂) e (H₂), e seus calores específicos variam de forma distinta de acordo com a temperatura.

Ferguson (2001) constata que, alguns calores específicos desses compostos são altamente sensíveis à temperatura, enquanto outros são menos sensíveis. Portanto Abu-Nada (2007) reforça que é mais importante calcular o calor específico da mistura como a soma dos calores específicos de cada composto individual, em vez de fazer uma estimativa de que toda a mistura se comporta como ar.

$$\frac{c_p}{R} = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 + a_5 T^4 \quad (23)$$

Na Figura 5, é possível observar os coeficientes de capacidade térmica específicos de cada composto químicos comum de ocorrer durante o processo de combustão, onde , a temperatura influencia no valor do coeficiente (ABU-NADA, 2007)

Species	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅
I					
CO ₂	0.2400779E1	0.8735096E-2	-0.6660708E-5	0.2002186E-8	0.632740E-15
H ₂ O	0.40701275E1	-0.1108450E-2	0.4152118E-5	-0.296374E-8	0.807021E-12
N ₂	0.36748261E1	-0.1208150E-2	0.2324010E-5	-0.6321756E-9	-0.225773E-12
O ₂	0.36255985E1	-0.1878218E-2	0.7055454E-5	-0.6763513E-8	0.215560E-11
CO	0.37100928E1	-0.1619096E-2	0.3692359E-5	-0.2031967E-8	0.239533E-12
H ₂	0.30574451E1	0.267652E-2	-0.5809916E-5	0.5521039E-8	-0.181227E-11
II					
CO ₂	0.4460800E1	0.3098170E-2	-0.1239250E-5	0.2274130E-9	-0.155259E-13
H ₂ O	0.27167600E1	0.294513E-2	-0.802243E-6	0.102266E-9	-0.484721E-14
N ₂	0.289631E1	0.151548E-2	-0.572352E-6	0.998073E-10	-0.652235E-14
O ₂	0.362195E1	0.736182E-3	-0.196522E-6	0.362015E-10	-0.289456E-14
CO	0.298406E1	0.148913E-2	-0.578996E-6	0.103645E-9	-0.693535E-14
H ₂	0.3100190E1	0.511194E-3	0.526442E-7	-0.349099E-10	0.369453E-14

Figura 5: Coeficientes para as capacidades térmicas específicas das espécies dependentes da temperatura (I) $T \leq 1000$. and (II) $1000 \leq T \leq 3200$.

Fonte: Ferguson (2001).

A constante dos gases para a mistura é calculada por:

$$R_{mix} = \frac{R_u}{M_{mix}} \quad (24)$$

Uma vez que (R_u) é a constante universal dos gases e (y_i) a fração molar, a massa molar (M_{mix}) é dado por:

$$M_{mix} = \sum_{i=1}^n y_i M_i \quad (25)$$

O peso molecular da mistura ar-combustível antes que ocorra a combustão é calculada a partir da equação (26).

$$M_{mix} = y_a M_a + y_f M_f \quad (26)$$

As frações molares e de massa do combustível são apresentadas como:

$$y_f = \frac{1}{1 + \frac{4,76 a_s}{\lambda}} \quad (27)$$

Em que (λ) é fator lambda entre a relação ar-combustível estequiométrica (AF_s) e a relação ar-combustível real AF . ($\lambda = 1$) representa uma mistura estequiométrica, ($\lambda > 1$) representa uma mistura com excesso de combustível, ou seja uma mistura rica e ($\lambda < 1$) representa uma mistura pobre, ou seja, com excesso de ar.

$$\lambda = \frac{1}{\Phi} = \frac{AF_s}{AF} = \frac{\left[\frac{\text{Massa de combustível}}{\text{Massa de ar}} \right]_{\text{estequiométrico}}}{\left[\frac{\text{Massa de combustível}}{\text{Massa de ar}} \right]_{\text{real}}} \quad (28)$$

Abu-Nada (2007) faz a análise termodinâmica para um sistema fechado e uma alteração no processo, partindo da primeira lei da termodinâmica, onde (δQ) é a taxa de transferência de calor, (δW) é a taxa de trabalho exercido pelo sistema e (dU) a variação da energia interna do sistema, da seguinte forma:

$$\delta Q - \delta W = dU \quad (29)$$

Além disso, Ferguson (2001), para um gás ideal dado pela equação de estado (14) e com calor específico médio constante, a variação da energia interna é equivalente ao produto da massa interna no cilindro (m), calor específico de volume constante (C_v) e a variação da temperatura do gás, logo:

$$dU = m C_v dT_g \quad (30)$$

Abu-Nada (2007) relata que a quantidade total de calor fornecida ao cilindro pela queima de combustível em um único ciclo (Q_{in}) é o produto entre a massa do combustível (m_f) e o menor valor de aquecimento LHV , e é dada por:

$$Q_{in} = m_f LHV \quad (31)$$

Ferguson (2001) afirma que, o calor total necessário adicionado ao sistema a partir do combustível até que a posição da manivela alcance o ângulo θ é calculado como:

$$Q(\theta) = Q_{in} x_b \quad (32)$$

Onde Ferguson (2001) mostra que, a fração do combustível que foi queimada (x_b), pode ser expressa por:

$$x_b = 1 - \exp\left(-5\left(\frac{\theta - \theta_s}{\Delta\theta}\right)^3\right) \quad (33)$$

Outrossim Abu-Nada (2007) demonstra que, a quantidade total de perda de calor do sistema quando a manivela se move em um incremento de (θ) é a relação entre, o coeficiente de transferência de calor para gases no cilindro (h_{cg}), a área de transferência de calor (A_h), velocidade média do gás no cilindro (ω), temperatura do gás no cilindro (T_g) e a temperatura do cilindro (T_c):

$$Q_{loss} = \frac{h_{cg} A_h}{\omega} (T_g - T_c) d\theta \quad (34)$$

O modelo de biela-manivela, conforme apresentado por Pulkrabek (2004), fornece as grandezas instantâneas de volume do cilindro, dado pela relação entre o volume total do cilindro (V_c), a área do cilindro ($\frac{\pi D^2}{4}$), e o deslocamento do pistão ($x(\theta)$).

$$V(\theta) = V_c + \frac{\pi D^2}{4} x(\theta) \quad (35)$$

A área em função do ângulo da manivela, que é calculada pelo diâmetro (D), o comprimento do volume (S), e o raio do cilindro (R).

$$A_h(\theta) = \frac{\pi D^2}{4} + \frac{\pi D S}{2} \left(R + 1 - \cos(\theta) + \left(R^2 - \sin^2(\theta) \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (36)$$

E o deslocamento, calculado pela relação entre o raio do cilindro (R) e o comprimento da biela (l).

$$x(\theta) = (l + R) - \left(R \cos(\theta) + \left(l^2 - \sin^2(\theta) \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (37)$$

Segundo Abu-Nada (2007), a pressão no cilindro em função do ângulo da manivela pode ser expressa segunda a função dada pela relação entre, a quantidade total de calor fornecida ao cilindro pela queima de combustível em um único ciclo (Q_{in}), a fração do combustível que foi queimada, volume instantâneo do cilindro ($V(\theta)$), velocidade média do gás no cilindro (ω), temperatura do gás no cilindro (T_g), a temperatura do cilindro (T_c) e a relação de calor específico (k).

$$\begin{aligned} P(\theta) = & \frac{4}{3}P(\theta - \Delta\theta) - \frac{1}{3}P(\theta - 2\Delta\theta) + \frac{k-1}{3V}Q_{in} (3x_b(\theta) - 4x_b(\theta - \Delta\theta) \\ & + x_b(\theta - 2\Delta\theta)) + \frac{2}{3} \frac{(k-1)}{3V} \left(h_{cg} A_h(\theta) (T_g - T_c) \right) \frac{1}{\omega} - \frac{2kP(\theta - \Delta\theta)}{3V(\theta)} \\ & \cdot \left(\frac{V(\theta + \Delta\theta) - V(\theta - \Delta\theta)}{2\Delta\theta} \right) \end{aligned} \quad (38)$$

Após o cálculo da pressão, Pulkrabek (2004), afirma que é possível determinar a temperatura dos gases no cilindro utilizando a equação de estado, que é a relação entre, a

massa do gás (m), a constante universal dos gases (R_g), a pressão em função do ângulo da manivela ($P(\theta)$) e o volume em função do ângulo da manivela ($V(\theta)$).

$$T_g = \frac{P(\theta)V(\theta)}{mR_g} \quad (39)$$

O coeficiente de transferência de calor convectivo na Equação (40), denotado por (h_{cg}), é determinado pelo modelo de Woschni (1967), que é dado em função do diâmetro do cilindro (D), pressão no interior do cilindro (P), a temperatura do gás no interior do cilindro (T_g).

$$h_{cg} = 3,26D^{-0,2} \cdot P^{0,8} T_g^{-0,55} w^{0,8} \quad (40)$$

Em que: (w) é a velocidade do gás queimado em função do ângulo da manivela, dado pela relação das grandezas, volume de deslocamento (V_d). Entretanto Neshat (2014) mostra que, (V_r), (T_{gr}) e (P_r) representam as propriedades de estado de referência no fechamento da válvula de admissão, enquanto (P_m) é a pressão na mesma posição, obtida para (P) sem combustão, ou seja, valores de pressão durante a ignição. Abu-Nada (2007) conclui que o valor de (C_1) é especificado como ($C_1 = 0$), para processos de compressão e ($C_1 = 0,00324$) para os processos de combustão e expansão, logo:

$$w(\theta) = 2,28\bar{U}_p + C_1 \frac{V_d T_{gr}}{V_r P_r} (P(\theta) - P_m) \quad (41)$$

Em que (\bar{U}_p) Abu-Nada (2007) mostra que, é a velocidade média do pistão e é determinada a partir da relação entre o comprimento do volume (S) e a rotação do motor (N).

$$\bar{U}_p = \frac{2NS}{60} \quad (42)$$

Segundo Oliveira (2018), os quatro tempos do motor ocorrem dentro do limite do cilindro que está compreendido entre o Ponto Morto Superior e o Ponto Morto Inferior, como pode-se observar na Figura 6. Brunetti (2018) completa que, o PMS ou Ponto Morto Superior, é igual a 0° para o tempo de ignição.

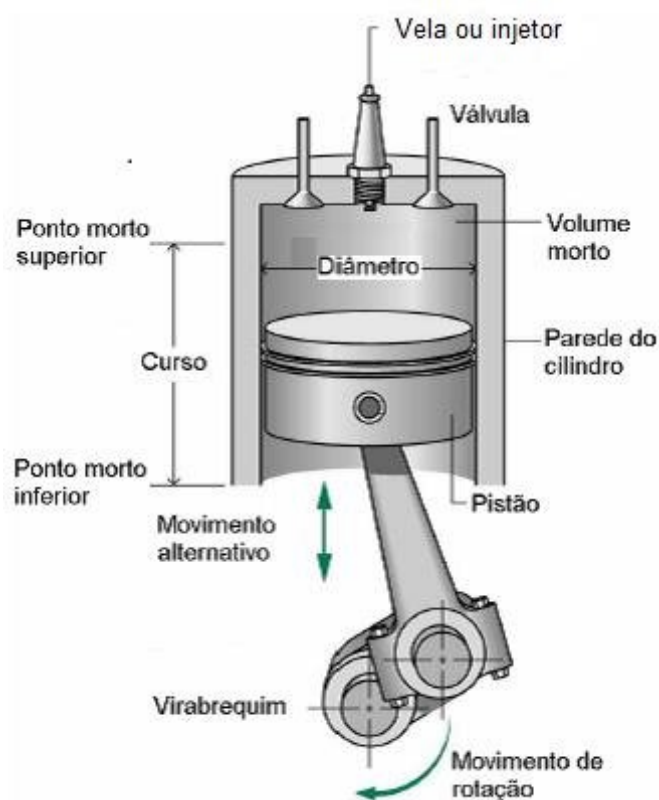


Figura 6: Ilustração do cilindro-pistão de um motor de combustão interna.
Fonte: Oliveira (2018).

Yun (2022) explica que, para minimizar o trabalho negativo, é preferível que a máxima pressão resultante da combustão ocorra durante a fase de expansão, próxima ao Ponto Morto Superior (PMS).

Segundo Dinesh (2023), como a combustão não é instantânea e leva um tempo finito, incluindo atraso de ignição, propagação da chama e sua extinção, é crucial que o início da combustão ocorra suficientemente cedo para que o pico de pressão aconteça no momento ideal, isso requer um avanço na ignição em relação ao PMS.

Brunetti (2018) sustenta que, atraso na combustão e a propagação da chama podem ser observados indiretamente pela evolução da variação de pressão no diagrama $p - \alpha$ do motor, especialmente na região de combustão, conforme mostrado na Figura 7.

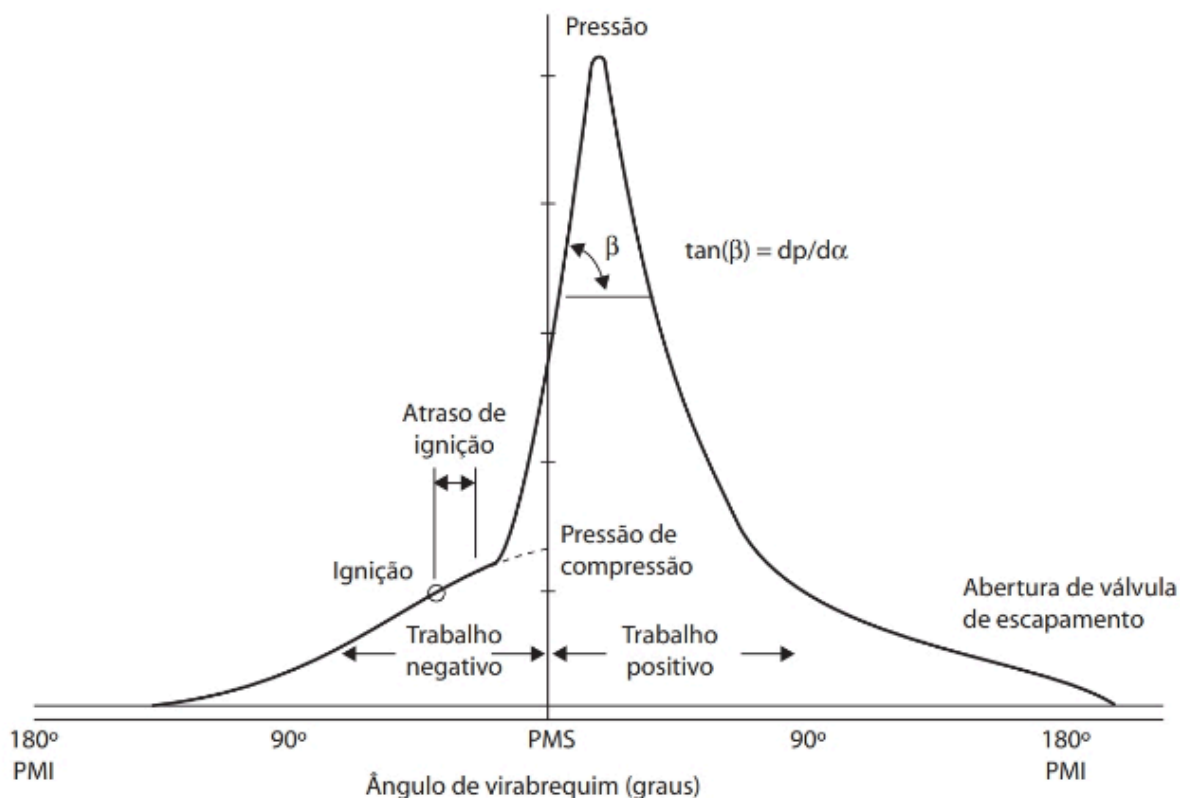


Figura 7: Diagrama $p - \alpha$ para uma combustão normal.
Fonte: Brunetti (2018).

Segundo Yun (2022), outras características do motor são impactadas pelo tempo de ignição, como o avanço da ignição, que resulta em um aumento contínuo da pressão no cilindro devido à maior força de compressão de uma maior massa de combustível queimada, no entanto, a pressão máxima é menor devido caso o tempo de ignição esteja a frente do PMS.

Dinesh (2023) ainda articula que, para veículos com motor de ignição por centelha (SI), GNV ou HCNG, a tecnologia de temporização de ignição variável não é necessária, sendo um tempo de ignição fixo simples suficiente para uma ampla gama de operações, entretanto, para estabelecer um tempo de ignição eficaz, é necessário investigar várias opções de temporização.

2.3 Combustíveis

Segundo Loyte (2022), outro parâmetro importante para o funcionamento do motor é a octanagem, que é a resistência que a gasolina tem à detonação, sem que o combustível entre em autoignição antes do momento ideal.

Para a melhoria da octanagem da gasolina, ou seja, para que seja possível se aproximar de um ponto ótimo de combustão, é possível que seja feita uma mistura do combustível principal com outros aditivos, como por exemplo o etanol, que no Brasil é utilizado uma fração de 25% de etanol para 75% de gasolina, sendo essa porcentagem determinada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (LEAL, 2022).

Além disso, Loyte (2022) argumenta que o etanol possui um índice de octanagem igual a 92, superior ao da gasolina que varia na faixa de 82 a 92, o que o torna o etanol resistente às condições de detonação no motor.

Ademais Loyte (2022) sustenta que, devido a todo contexto ambiental presente na sociedade, que está relacionado com a poluição, viu-se a necessidade de desenvolvimento de biocombustíveis, que emitissem menos gases poluentes e que fossem tão efetivos quanto os tradicionais.

Com isso, Brunetti (2018) argumenta que, com o desenvolvimento desse ramo tecnológico, logo surgiu a gasolina que era feita a partir dos processos da destilação do petróleo e logo em seguida fazia-se o craqueamento do material.

Filippo (2014) constata que, com o aumento da circulação de automóveis que utilizavam motores de ignição por centelha, a gasolina tornou-se ainda mais popular. A primeira tentativa de controle da inibição da detonação da gasolina ocorre quando Midgley e Brown, experimentalmente, descobrem ao misturar o composto organo-metálico Chumbo-Tetra-Etil com a gasolina, um composto organometálico, com a gasolina (BRUNETTI, 2018).

Filippo (2014) contrapõe que, já o óleo Diesel, composto principalmente por hidrocarbonetos, também é um derivado do petróleo. De acordo com Teixeira (2018), o

processo de obtenção do óleo também é principalmente realizado por destilação atmosférica e destilação a vácuo, e se baseia na diferença do ponto de ebulição dos hidrocarbonetos.

Por este processo são separados diversos componentes, como o Gás Combustível, o Gás Liquefeito de Petróleo e a Nafta. Assim surgem duas correntes, uma leve e outra pesada, que dá origem ao Diesel (FILIPPO, 2014), como observa-se na Figura 8.

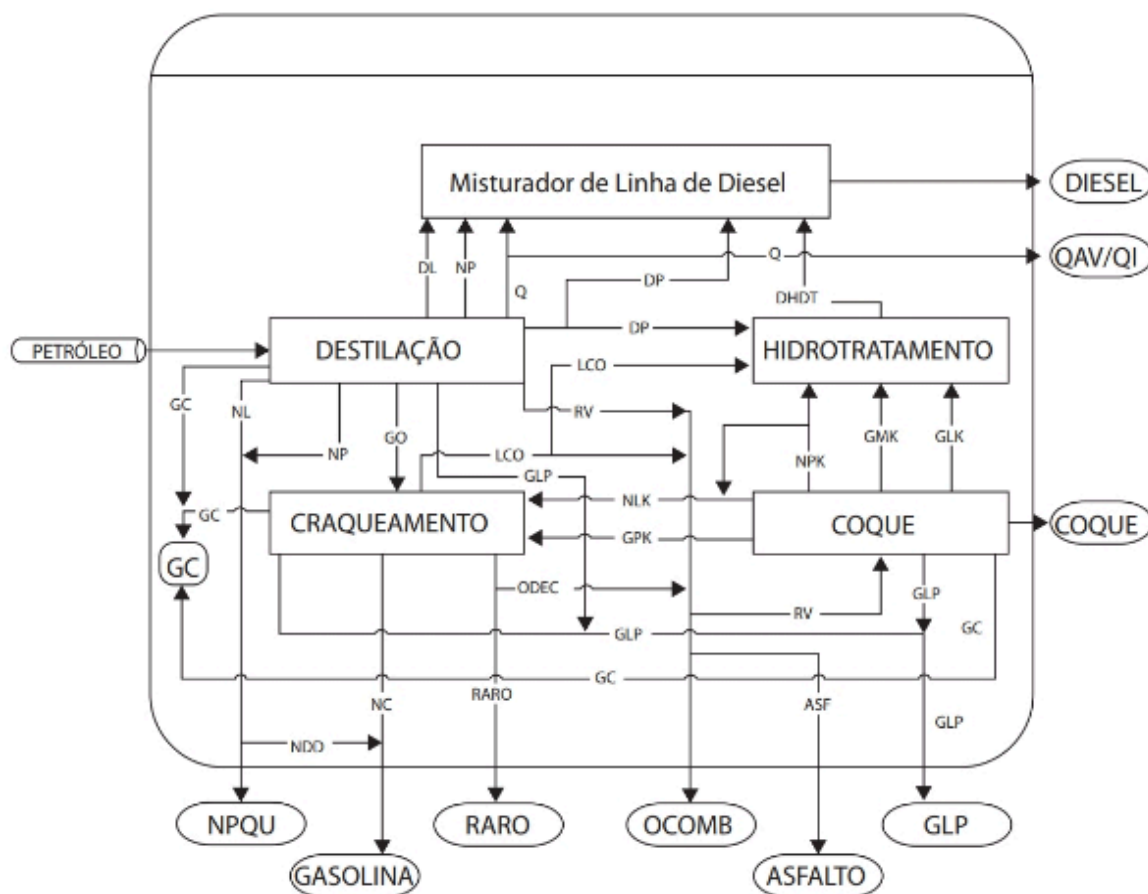


Figura 8: Esquema da destilação atmosférica e a vácuo [A].

Fonte: Brunetti (2018).

Segundo Brunetti (2018), o ponto de ebulição dos diferentes hidrocarbonetos aumenta de forma quase regular com a massa molecular, essa discrepância é explorada na destilação fracionada de grupos de hidrocarbonetos para separar o petróleo em derivados de importância comercial. Independentemente do processo de refino empregado, a unidade de destilação é uma presença constante. Martins (2000) reforça que a unidade de destilação representa o processo principal, alimentando os demais processos a partir de seus produtos.

Brunetti (2018) explica que a nafta, que compreende todos os cortes entre aproximadamente 30 °C e 250 °C, abrangendo hidrocarbonetos de quatro a doze átomos de carbono, é dividida em duas correntes: leve e pesada. Além disso, Martins (2000), completa que a corrente leve é principalmente utilizada na produção de gasolina e, dependendo das temperaturas ajustadas para as bandejas da torre, pode resultar em nafta petroquímica ou solvente leve.

Para Geissler (2023), com a necessidade de diminuir as emissões de gases poluentes, surgiram os biocombustíveis, sendo os mais populares o biodiesel e o etanol. Zavalhia (2018) explica que, o biodiesel é um óleo que advém de fontes vegetais ou animais e que devido à sua composição química, o biodiesel é biodegradável, não tóxico e renovável.

Loyte (2022) reforça que tal combustível pode ser obtido através dos óleos ou gorduras animais e vegetais que sofrem os processos de craqueamento, esterificação e transesterificação. Geissler (2024) contextualiza que, atualmente sua aplicação principal é na mistura com o diesel de petróleo, com o objetivo de reduzir as emissões de gases poluentes.

Zavalhia (2018) também argumenta que o etanol é outra solução que surge para os problemas ambientais destinados aos motores de ignição por centelha, sendo que este biocombustível é um álcool produzido da cana-de-açúcar a partir da fermentação.

Geissler (2023) destaca que o etanol como combustível oferece uma vantagem na velocidade da chama, o que beneficia o processo de combustão. Na Tabela 1, observa-se a comparação feita por Loyte (2022) entre as propriedades da gasolina e do etanol.

TABELA 1 - Propriedades Combustíveis do Etanol e da Gasolina.

Características	Etanol	Gasolina
Química	C ₂ H ₅ OH	Mistura de hidrocarbonetos (C ₅ -C ₁₂)
Densidade específica a 15.55 °C	0,79	0,72-0,75
Temperatura de destilação °C	78,4	32-210
Ponto de inflamação °C	12	13
Viscosidade Cinemática (mm ² /s)	1,5	0,6
Número de octano Pesquisa	111	91-100
Número de octano Motor	92	82-92
Conteúdo de oxigênio (% em peso)	34,7	0
Relação estequiométrica ar/combustível	8.97	14.6
Limites de inflamabilidade por vapor (vol.9%)	3,5-15	0,6-8
Temperatura da chama em 101.325 kPa (°C)	478	392
Velocidade máxima da chama (m/s)	0,33	0,4

Fonte: Adaptado de Loyte (2022).

2.4 Etanol

Segundo Mendiburu (2022), durante a crise do petróleo em 1972, o etanol surge como opção para os combustíveis fósseis, sendo produzido em larga escala e tema de pesquisa em vários países a fim de se consolidar como fonte de energia alternativa.

Donato (2012) contextualiza que, na mesma época, no Brasil iniciou-se a produção de etanol através da fermentação da cana-de-açúcar em larga escala, além de implementar o programa ProÁlcool, a fim de propor metas energéticas, produção e exportação de alimentos e buscar a estabilidade interna.

Com isso, Donato (2012) explica que, o Brasil se tornou um dos maiores produtores do biocombustível, tendo produzido 600 milhões de litros entre 1975 a 1976. Ibraim (2023) contextualiza que, atualmente o etanol é produzido por diversos países e advém principalmente da cana-de-açúcar, milho, beterraba e trigo.

Além disso, é uma fonte de energia renovável e menos poluente em comparação aos combustíveis fósseis, uma vez que quando utilizado em veículos automotores emitem menos gases poluentes (IBRAIM,2023).

Na Figura 9 é possível observar os processos para a produção do etanol, além disso, Donato (2012, p.60) explica que tais procedimentos se baseiam em,

Após a colheita, a matéria-prima é enviada para lavagem e logo após para um triturador e esmagamento (1). Em seguida ocorre um processo de separação (2) em que são utilizadas enzimas para separação dos açúcares presentes na matéria-prima. Os açúcares separados são transformados em etanol por um processo de fermentação (3), utilizando-se microrganismos específicos, e finalmente ocorre uma purificação em que o etanol é destilado (4), daí segue para o armazenamento e em seguida à distribuição.

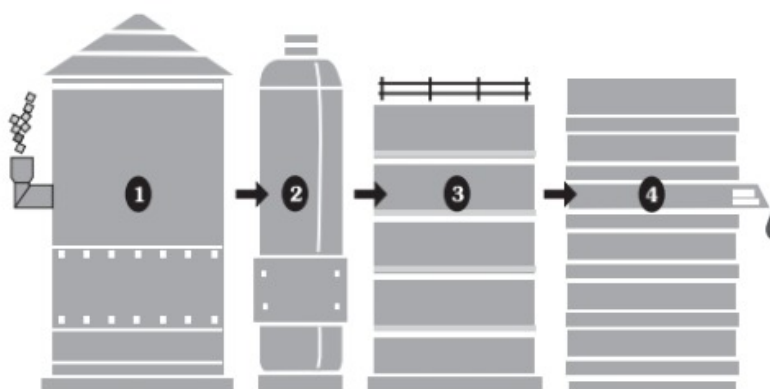


Figura 9:Esquema simplificado de produção do etanol.
Fonte: Donato (2012).

Mendiburu (2022) ressalta que os principais pontos que fizeram o etanol ser popularizado no país foram a descentralização do poder econômico dos produtores de combustíveis fósseis, a independência de combustíveis importados e a estabilização dos valores de mercado da gasolina. Donato (2012) explica que, como ocorre a reabsorção de gases poluentes durante o crescimento da cana-de-açúcar, esse combustível é uma fonte menos poluente.

Ademais, Ibraim (2023) contextualiza que, depois de processar a matéria prima, ainda obtém-se o bagaço da cana, que pode ser utilizado como fonte de energia elétrica. Seu uso foi inicialmente como substituto da gasolina, uma vez que o mundo na década de 1970 passava pela crise do petróleo.

Contudo, ao longo dos anos, tal combustível recebeu outras aplicações, como ocorreu no final dos anos 1980, em que ele foi utilizado em carros *flex*, tecnologia americana que se

baseava em carros que poderiam utilizar tanto o álcool quanto a gasolina como combustíveis, em mistura ou separados (DONATO,2012).

Cortez (2016) argumenta que, atualmente, o etanol volta ao segundo plano, devido principalmente à grande extração de petróleo advindas da região do pré-sal. Para que, esse biocombustível torne a ser utilizado como meio principal de fonte energética, o principal ponto a ser melhorado é a baixa densidade energética do etanol, que representa em motores de combustão interna uma baixa eficiência do ciclo termodinâmico utilizando o biocombustível, que impossibilita a disseminação dele substituindo a gasolina e para uso em carros *flex*.

Thamilarasan (2022) articula que, quando todas as configurações de teste são comparadas, a mistura de etanol-gasolina apresenta o menor consumo específico de combustível (CEC), portanto, a medida que a carga do motor aumenta, as proporções das misturas também aumentam, resultando em uma redução no CEC, como observado na Figura 10. Em comparação com a gasolina pura, as misturas E20N10 e E20N20 alcançaram reduções de consumo de combustível de 13,6% e 15,4%, respectivamente, enquanto as misturas E20 registraram uma redução de 12% no consumo de combustível.

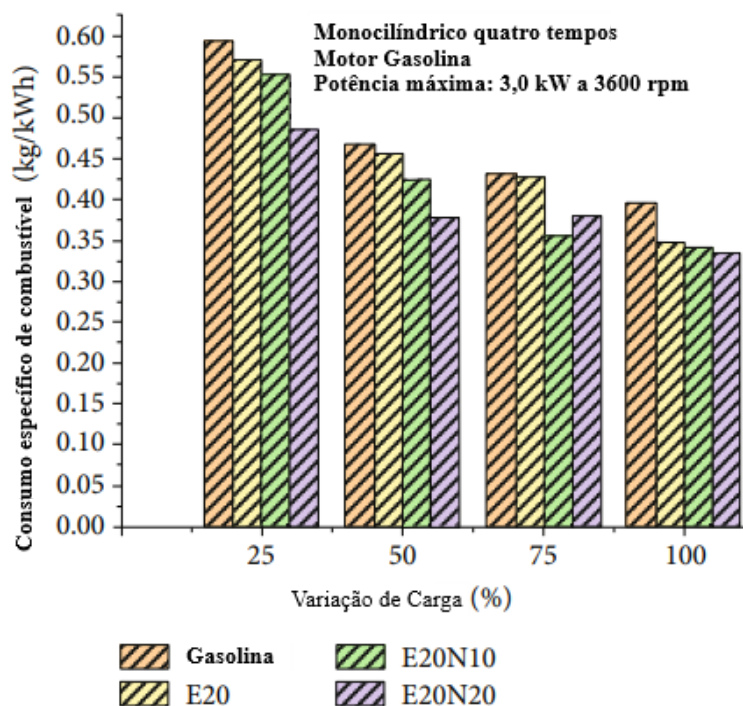


Figura 10: Impacto da alumina no consumo de combustível em motores a etanol e gasolina.

Fonte: Adaptado de Thamilarasan (2022).

Badawy (2024) explica que isso ocorre porque o etanol possui um valor calorífico menor por massa e volume em comparação com a gasolina pura, o que implica em uma demanda maior de combustível metanol para obter o mesmo desempenho de frenagem. Além disso, Turner (2011) complementa que, o combustível metanol-gasolina apresenta um maior CEC devido à densidade superior do metanol, resultando em uma maior quantidade de massa injetada no motor por unidade de volume a uma mesma pressão de injeção.

Savelenko (2022) ressalta que o etanol comercial, um biocombustível composto principalmente de etanol derivado de fontes renováveis e é identificado por diferentes denominações, como E96, E90, E80 e E70, sendo importante ressaltar que o etanol anidro possui um teor mínimo de água, ao passo que o etanol hidratado contém uma quantidade superior de água.

Thamilarasan (2022) afirma que na carga máxima, as misturas de etanol E20, E20N10 e E20N20 demonstraram reduções de 2%, 6,5% e 8,2%, respectivamente, para o monóxido de carbono em comparação com a gasolina, conforme ilustrado na Figura 11.

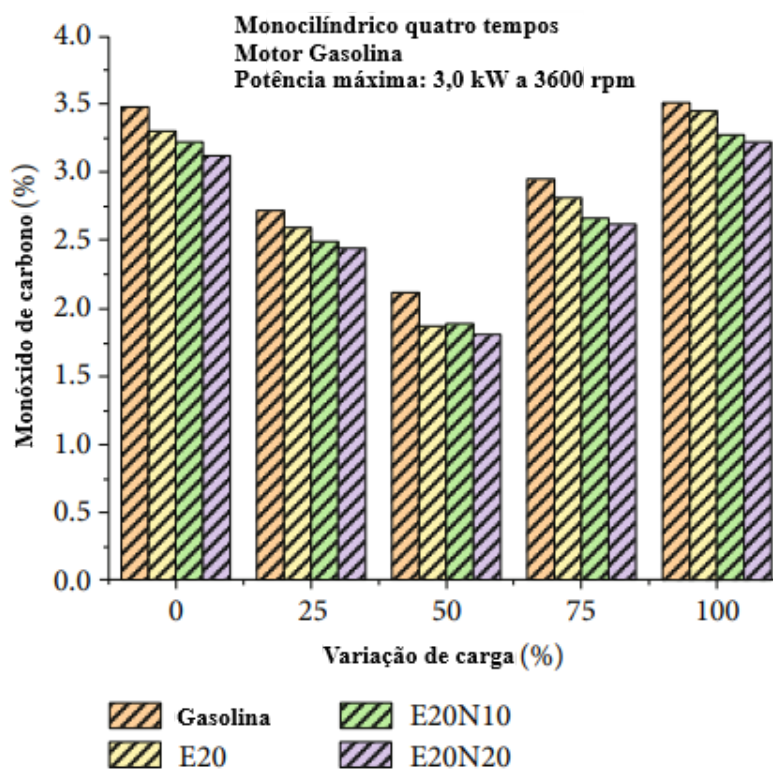


Figura 11: Impacto da alumina na emissão de monóxido de carbono em motor a etanol-gasolina.

Fonte: Adaptado de Thamilarasan (2022).

Thamilarasan (2022) ainda afirma que, comparadas à gasolina, as misturas E20N10 e E20N20 alcançaram reduções de 10,8% e 14,5% no CO, respectivamente, enquanto as misturas E20 mostraram uma redução de 11,5% nas emissões de carbono., com isso o uso do etanol resultou em uma diminuição significativa no teor de CO, atribuída à presença de mais moléculas de oxigênio na estrutura do etanol.

Loyte (2022) contextualiza que, os dados na Tabela 1 englobam propriedades essenciais do combustível, abrangendo frações de massa, baixos valores de aquecimento, densidade, capacidade térmica à temperatura de injeção e massa molecular.

Para Ibraim (2022), tais parâmetros são fundamentais para a realização de simulações, análises do desempenho do motor e previsão de emissões em diferentes sistemas de combustão.

2.5 Análise Técnica

Budynas (2016) afirma que o uso de técnicas de análise são as ferramentas principais para o desenvolvimento de tecnologias de diversos ramos das ciências. Na engenharia, as principais ferramentas utilizadas advém da física, uma vez que essa área traduz a realidade em termos matemáticos. Budynas (2016, p.8), reforça que,

Hoje em dia, o engenheiro tem uma grande variedade de ferramentas e recursos disponíveis para auxiliar na solução de problemas de projeto. Microcomputadores baratos e pacotes de programas computacionais robustos fornecem ferramentas de imensa capacidade para o projeto, a análise e a simulação de componentes mecânicos.

Fialho (2009) explica que, com o desenvolvimento tecnológico dos eletrônicos, tornou-se comum o uso de recursos computacionais, como programas de desenho com auxílio computacional, para modelagem de 3-D de peças e estruturas.

Além disso, o conceito de engenharia com auxílio computacional, define-se em geral, como qualquer *software* que tenha recursos que permitam a construção de um problema da engenharia. Dessa forma, Budynas(2016, p.8) enfatiza, que

Entre alguns exemplos de programas fundamentados na engenharia para aplicações de engenharia mecânica — programas que também poderiam ser integrados a um sistema CAD —, temos programas para análise de elementos finitos (FEA) capazes de realizar a análise de tensão e deflexão (ver Capítulo 19), vibração e transferência de calor (por exemplo, Algor, ANSYS e MSC/NASTRAN);

Além disso, Fialho (2009) constata que existem também as análises 2-D, que são geralmente aplicadas em elementos em que a espessura não é relevante, ou seja, nesse meio de análise, a variação dos parâmetros ocorrem e podem ser representados em apenas duas dimensões. Pode-se ter como exemplo a análise da variação de temperatura em uma chapa.

Fialho (2009, p.93), reforça que, para as análises 2-D, “Têm aplicação específica em análises de estruturas cuja dimensão de espessura é muito menor que as duas outras, por isso são apropriados a análises de vasos de pressão, tanques de combustíveis, recipientes de embalagens metálicas ou plásticas, perfilados metálicos ou plásticos, blindagens etc”.

Segundo Çengel (2009), existem também as análises 1-D, que consistem em análises de sistemas que podem ser estudados em uma única dimensão, devido à sua baixa complexibilidade e baixo detalhamento do funcionamento.

Um exemplo que pode ser observado é a modelagem de um fluido em um tubo, como um duto de ar em um sistema de ar-condicionado. Çengel (2009, p.34) reforça que,

O escoamento de um fluido em um duto pode frequentemente ser considerado unidimensional, isto é, as propriedades podem variar em uma única direção (direção do escoamento). Como resultado, todas as propriedades são consideradas uniformes em qualquer seção normal à direção do escoamento e são tratadas como valores médios de mistura para toda seção transversal.

Além disso, Çengel (2009) completa que o tipo de análise 0-D, se baseia em estudos de um sistema que não levam em consideração, as dimensões dos objetos estudados nem o tempo em que o sistema funcionará, sendo muito utilizada em estudos de balanço energético de sistemas termodinâmicos ou em circuitos eletrônicos, uma vez que, nesses tipos de sistemas deseja-se obter o quanto de energia é gasto a cada equipamento.

Kuleshov (2011) destaca que os centros de pesquisa avançados estão atualmente desenvolvendo intensivamente *softwares* para resolver problemas relacionados ao aprimoramento dos processos internos dos motores de combustão interna, tendo como principal recurso a tecnologia de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), que permite a modelagem tridimensional do fluxo de gás e da injeção de combustível nos cilindros e coletores do motor.

De acordo com Stephenson (1995), durante esses cálculos, os processos de evaporação, combustão e formação de substâncias nocivas são simulados. No entanto,

Stephenson (1995) aponta que uma das principais desvantagens do CFD é a intensa demanda por capacidade de processamento, o que requer o uso de computadores de alta potência para simulações, uma vez que a precisão dos resultados está diretamente relacionada à capacidade de processamento do computador.

Kuleshov (2011) também enfatiza que a preparação dos dados para um único cenário de cálculo é uma tarefa que requer um especialista qualificado e pode levar vários dias. Além disso, Stephenson (1995) propõe que, o tempo de cálculo para um único cenário é longo, geralmente exigindo 30 horas ou mais, dependendo da precisão dos resultados desejados.

2.6 Software Diesel RK

O Diesel RK é um *software* de modelagem e simulação aberto de simulação com foco em motores de combustão interna, que oferece uma ampla gama de configurações para essas máquinas térmicas, tendo aplicação tanto na indústria quanto na área acadêmica. Segundo o Site do fabricante, (DIESEL-RK,2010)

O *software* DIESEL-RK foi projetado desde 1981 - 1982. Naqueles anos, foi aplicado em pesquisas de muitos motores com diferentes tamanhos, velocidades e aplicações. Todos esses anos, o *software* está melhorando para aumentar a eficiência e o campo de aplicação. Resultados de simulação em todas as pesquisas são comparados com dados experimentais obtidos por vários autores.

2.7 Considerações Finais

Neste capítulo as referências bibliográficas são consolidadas a fim de construir uma base teórica para o desenvolvimento do trabalho sobre Energia, Motor de Combustão Interna, Etanol, Análise Técnica e o *Software Diesel RK*, de forma auxiliar no desenvolvimento do trabalho.

O capítulo seguinte tem como objetivo construir a caracterização da presente pesquisa, apresentando suas principais classificações, métodos e ferramentas utilizadas no desenvolvimento.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é explicado e demonstrado a forma com que a pesquisa é desenvolvida a fim de classificar e especificar os tipos de ferramentas, métodos e pesquisas feitas. Outrossim, é feita a determinação das variáveis e indicadores que são utilizados no desenvolvimento do presente trabalho, para que seja possível analisar os cálculos feitos.

3.1 Tipos de pesquisa

A ciência é uma atividade que está sempre em constante evolução, que traz ao mundo todos os dias novas tecnologias e descobertas. Além disso, ela é uma base de empreendimento que tem como objetivo entender melhor o mundo, propondo hipóteses que o descrevam. Walliman (2015, p.18) reforça que, “desse modo, considera-se que a ciência avança por tentativa e erro: quando uma teoria é rejeitada, outra é proposta e testada; assim, a teoria mais adequada sobrevive”.

Com isso, entende-se que o meio utilizado para o teste dessas hipóteses é conhecido como métodos científicos, que por sua vez, pode ser descrito como, abordagens objetivas baseadas em evidência de forma organizada para realizar pesquisas em torno de uma ideia proposta. Dentre os diversos tipos de metodologias, Gray (2011, p.28) exemplifica que,

A metodologia de pesquisa escolhida é determinada por uma combinação de vários fatores, por exemplo, se o pesquisador acredita que haja algum tipo de “verdade” externa que precisa ser descoberta, ou seja, a tarefa de pesquisa é explorar e identificar as múltiplas perspectivas das pessoas em ambientes naturais, em campo. Portanto, ela é influenciada pela inclinação da pesquisa a uma perspectiva positivista, interpretativista ou outra. Também é influenciada, por exemplo, pela atitude do pesquisador diante das formas com que acha que a teoria deve ser aplicada. Se a pesquisa deve começar com um modelo ou perspectiva teórica (abordagem dedutiva) ou se esses modelos deveriam surgir dos próprios dados (indutivamente).

De tal forma Gil (2022) propõe que as metodologias científicas utilizadas para esclarecer uma hipótese são importantes para consolidar as explicações e evidências experimentais e observacionais que surgem ao longo do trabalho de um pesquisador. Outrossim, com a comprovação ou refutação de uma hipótese, se tem um meio mais confiável de avançar com pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos.

Walliman (2015) reforça que existem dois tipos de motivações que levam ao prosseguimento e comprovação de uma pesquisa. Uma delas a intelectual, que ocorre pelo simples prazer de adquirir conhecimento. Por outro lado, existe a razão de ordem prática, que se define pelo estado de necessidade de aprendizado, isto é, adquirir conhecimento com um objetivo em vista.

Desta maneira Cooper (2016) mostra que, surge a necessidade de se evidenciar os principais métodos de pesquisa, uma vez que, para cada hipótese construída, haverá uma classificação que oriente melhor o pesquisador durante a escolha dos métodos.

Além disso, permite a padronização dos estudos feitos a fim de avaliar a qualidade de uma pesquisa, fornecendo uma base homogênea para comparação entre diferentes trabalhos, utilizando essa classificação por critérios característicos. Segundo Gil (2022, p.40),

As pesquisas podem ser classificadas de diferentes maneiras. Mas para que essa classificação seja coerente, é necessário definir previamente o critério adotado. Com efeito, é possível estabelecer múltiplos sistemas de classificação e defini-los segundo a área de conhecimento, a finalidade, o nível de explicação e os métodos adotados.

Dentre essas classificações, existem as que se baseiam na forma com que a pesquisa será abordada. O primeiro método conhecido como pesquisa quantitativa, se consolida em uma forma de coleta de dados numéricos e estatísticos advindos de determinado fenômeno. Esse método se caracteriza por sua objetividade, precisão e a facilidade para padronizar os meios de operação que entregam os resultados definitivos.

Ademais, Walliman (2015, p.109), reforça que os principais objetivos desse modelo de pesquisa são "medir, fazer comparações, examinar relações, fazer previsões, testar hipóteses, construir conceitos e teorias, explorar, controlar e explicar".

Além disso, Cooper (2016) afirma que, existe como outra subclasse dos tipos de abordagem da pesquisa, o método qualitativo que tem como objetivo coletar dados descritivos, flexíveis, subjetivos e interpretativos, a fim de observar a complexidade do comportamento de determinada situação.

Walliman (2015) sugere que, devido à complexibilidade dos dados qualitativos, é mais viável reduzir a abrangência da coleta, uma vez que a mente não é eficaz ao lidar com um alto número de informações complexas, o que faz com que a reação do pensamento humano seja criar padrões que simplifiquem a relação entre os dados.

Por fim Creswell (2013) constata que, a última subclasse existente dentre os métodos de abordagem de pesquisa, é a pesquisa mista, que é uma combinação entre os métodos quantitativos e qualitativos, a fim de obter informações mais detalhadas sobre os fenômenos estudados.

Creswell (2013), afirma que as principais vantagens do método misto de pesquisa são, a abstração e estudo de modo persuasivo e rigoroso dos dados qualitativos e quantitativos, a concatenação de dados advinda das duas maneiras de pesquisa, a possibilidade de dar ênfase em uma das duas formas de dados, a flexibilidade de uso do método em diversos estágios da pesquisa e configura os procedimentos de pesquisa com base na filosofia e nas teoria físicas da hipótese.

Por conseguinte, existe a classificação por objetivos da pesquisa, isto é, de que maneira é possível que a pesquisa se realize. A pesquisa exploratória é uma das subclasses que tem como objetivo desenvolver uma hipótese que está relacionada a um problema da ciência estudada, explicitando variáveis relevantes para aquela solução. Para Cooper (2016, p.95):

A exploração é particularmente útil quando os pesquisadores não têm uma ideia clara dos problemas que encontrarão durante o estudo. Por meio dela, os pesquisadores desenvolvem conceitos de forma mais clara, estabelecem prioridades, desenvolvem definições operacionais e melhoram o projeto final da pesquisa;ela também pode economizar tempo e dinheiro.

Da mesma maneira Vergara (2016) articula que, existe também a classificação referente aos procedimentos técnicos, que se referem às ferramentas utilizadas para a construção da pesquisa. Segundo Gil (2022), um desses tipos de pesquisa é a bibliográfica, que usa de bibliografias referentes aos principais temas, isto é, as palavras-chave da pesquisa, a fim de consolidar teoricamente a construção do problema.

Para Vergara (2016), a pesquisa bibliográfica é todo aquele estudo que aborda materiais de acesso público, sendo este, de fonte primária ou secundária ou até mesmo de primeira ou segunda mão.

Para Gil (2022), outra ferramenta utilizada como procedimento técnico para as pesquisas é a metodologia experimental. Esse meio de estudo é muito popular em diversos ramos de estudo, já que, busca-se através dela reconhecer padrões em determinados fenômenos,além disso, é necessário que todas as variáveis e o ambiente experimental sejam

controlados, para que não haja imprevisibilidades ou interferências dos resultados. Segundo Vergara (2016, p.50),

Pesquisa experimental é investigação empírica na qual o pesquisador manipula e controla variáveis independentes e observa as variações que tais manipulação e controle produzem em variáveis dependentes. Variável é um valor que pode ser dado por quantidade, qualidade, característica, magnitude, variando em cada caso individual. Exemplo: na expressão sociedade globalizada, globalizada é a variável do conceito sociedade. Variável independente é aquela que influencia, determina ou afeta a dependente. É conhecida, aparece antes, é o antecedente. Variável dependente é aquela que vai ser afetada pela independente. É descoberta, é o consequente. A pesquisa experimental permite observar e analisar um fenômeno, sob determinadas condições.

Este estudo é essencialmente de natureza bibliográfica, visto que sua abordagem se fundamenta na consolidação da base teórica por meio da análise de trabalhos anteriores. Ademais, caracteriza-se como uma pesquisa exploratória, uma vez que propõe uma metodologia para otimizar o desempenho de um motor de combustão interna movido a etanol. Além disso, este trabalho adota uma abordagem mista, incorporando aspectos quantitativos e qualitativos. Os valores de desempenho são obtidos por meio de simulações, sendo posteriormente comparados com dados de um modelo obtido da literatura.

3.2 Materiais e Métodos

Para que seja possível realizar a análise do desempenho de um motor de combustão interna abastecido a etanol usando o *software* Diesel RK, é necessário esquematizar a sequência de passos e métodos de trabalho como se observa na Figura 12. Além disso, ela também ressalta os principais pontos que a presente pesquisa busca concretizar.

Em primeiro momento, realiza-se a pesquisa bibliográfica sobre o tema, a fim de consolidar a base teórica da pesquisa realizada, abrangendo assim os principais assuntos influentes em cada uma das palavras-chave, como mostra a Figura 13.

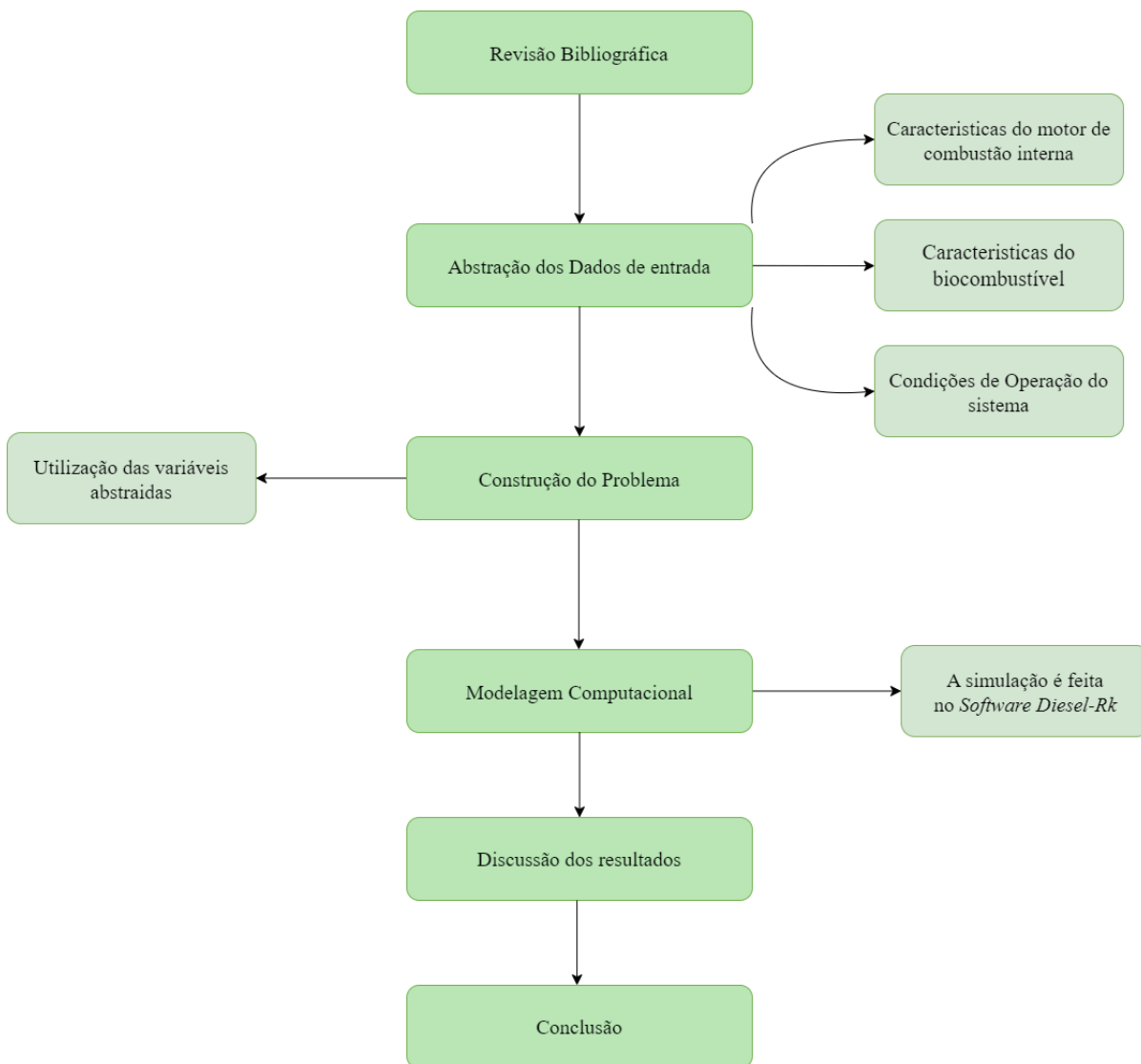


Figura 12: Fluxograma dos procedimentos da pesquisa.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

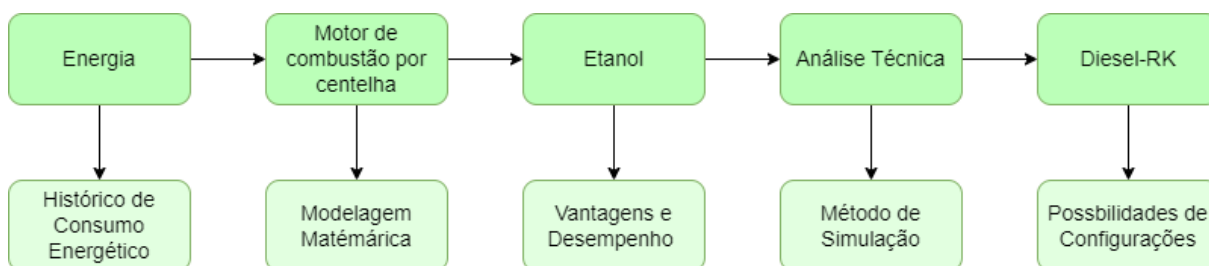


Figura 13: Fluxograma da Base Teórica de Estudo.
Fonte: Pesquisa direta(2023).

Além disso, os principais dados de entrada da pesquisa são consolidados a fim de definir cada um dos objetos de estudo, como as características do motor, do combustível e as condições de operação, estabelecendo dessa forma, as condições iniciais da pesquisa.

Em seguida, esses dados obtidos através da literatura são introduzidos como variáveis no *software* de simulação *Diesel-RK*, de forma coerente com as condições de operação proposta. Também é analisado no *software* citado, a forma mais eficiente do uso do biocombustível.

A Figura 14 mostra as possibilidades de configuração de tempos do motor e de tipos de ciclos para combustíveis.

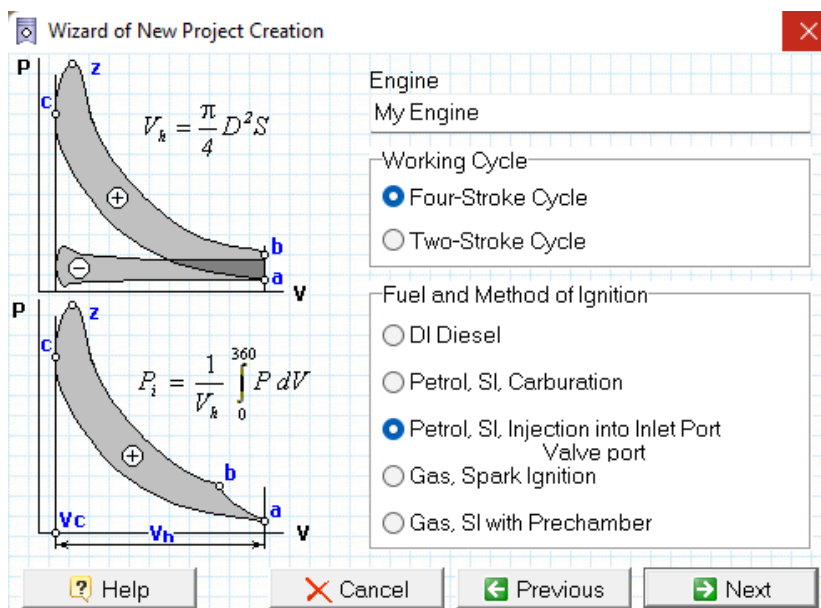


Figura 14: Tela de configuração 1 do Diesel RK.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Em seguida pode-se observar na Figura 15 os modelos de disposição dos pistões, disponíveis para a seleção.

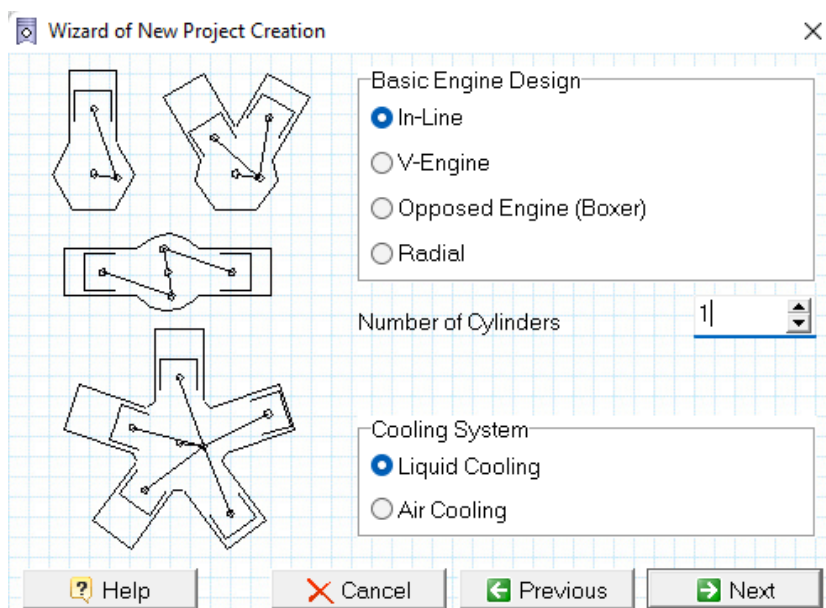


Figura 15: Tela de configuração 2 do Diesel RK.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Em seguida, o *software* permite o detalhamento geométrico do cilindro, como mostra a Figura 16.

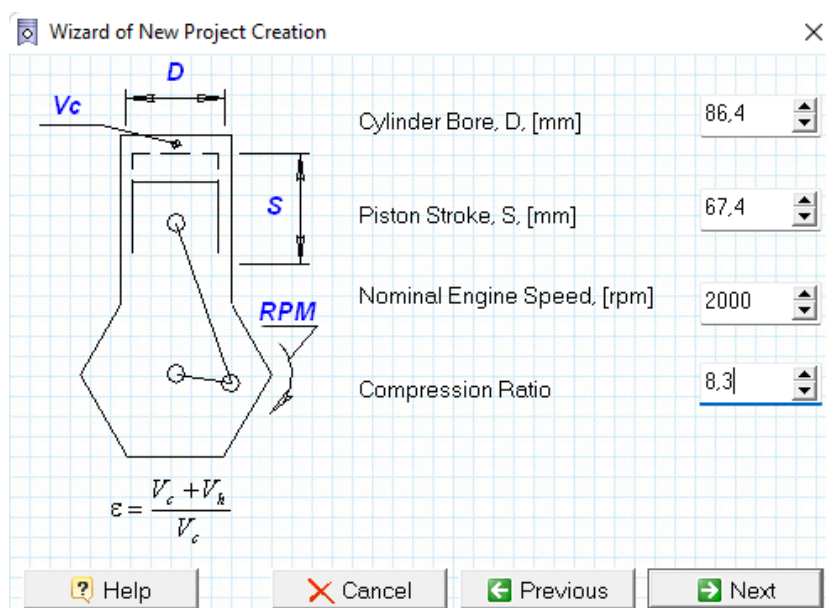


Figura 16: Tela de configuração 3 do Diesel RK.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Então, o programa permite ao usuário a seleção de qual ambiente o motor operará, considerando as devidas pressões do ambiente, como a Figura 17 exemplifica.

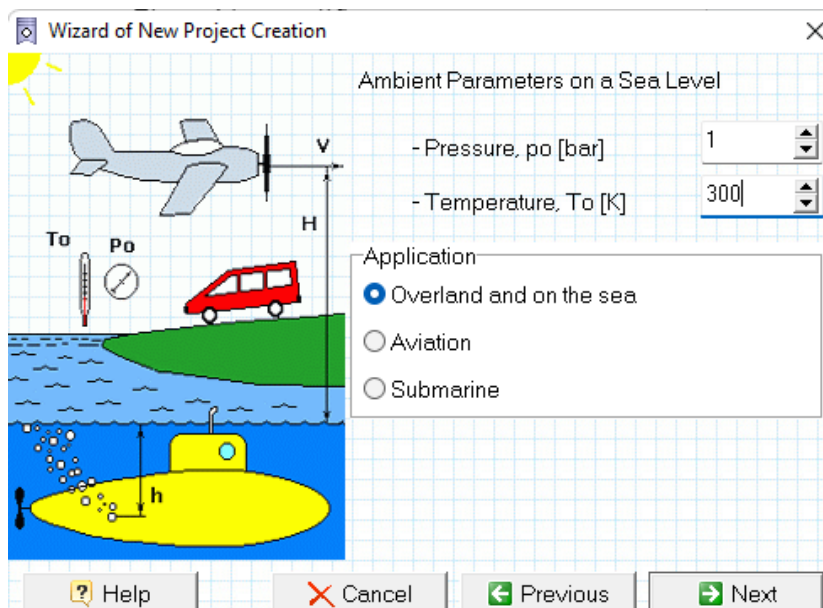


Figura 17: Tela de configuração 4 do Diesel RK.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Por fim, é apresentada a possibilidade de configuração da quantidade de válvulas operantes no motor conforme mostra a Figura 18;

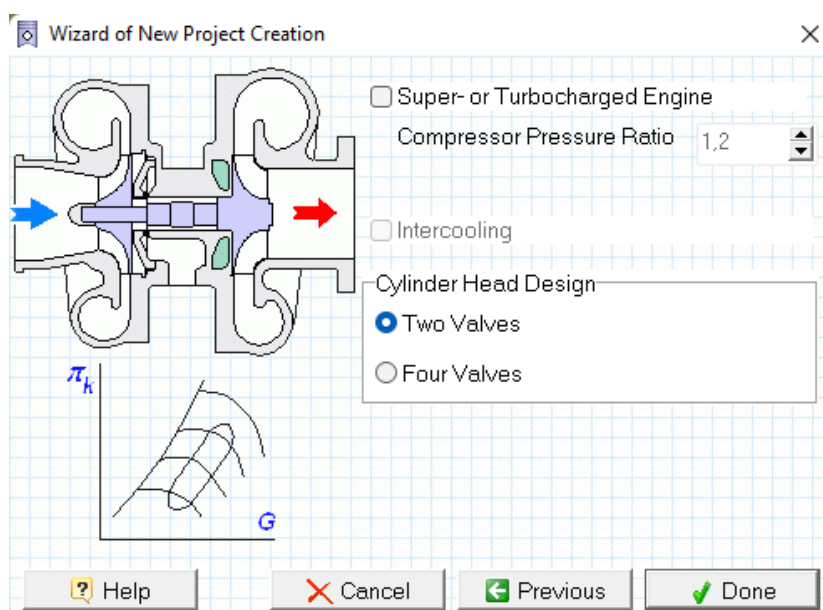


Figura 18: Tela de configuração 5 do Diesel RK.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Por fim, através de ferramentas de análise de dados, como o *Microsoft Excel*, os resultados obtidos da simulação do motor de combustão interna, são analisados e comparados

com os dados da literatura que forneça valores reais de motores operando com o combustível (etanol), com o objetivo de validar o uso do *software*.

Além disso, é apresentado o comportamento do motor com o uso do etanol como combustível. Os valores de desempenho, consumo e poluentes são extraídos do *software*. A progressão do desenvolvimento da simulação pode ser observada na Figura 19.

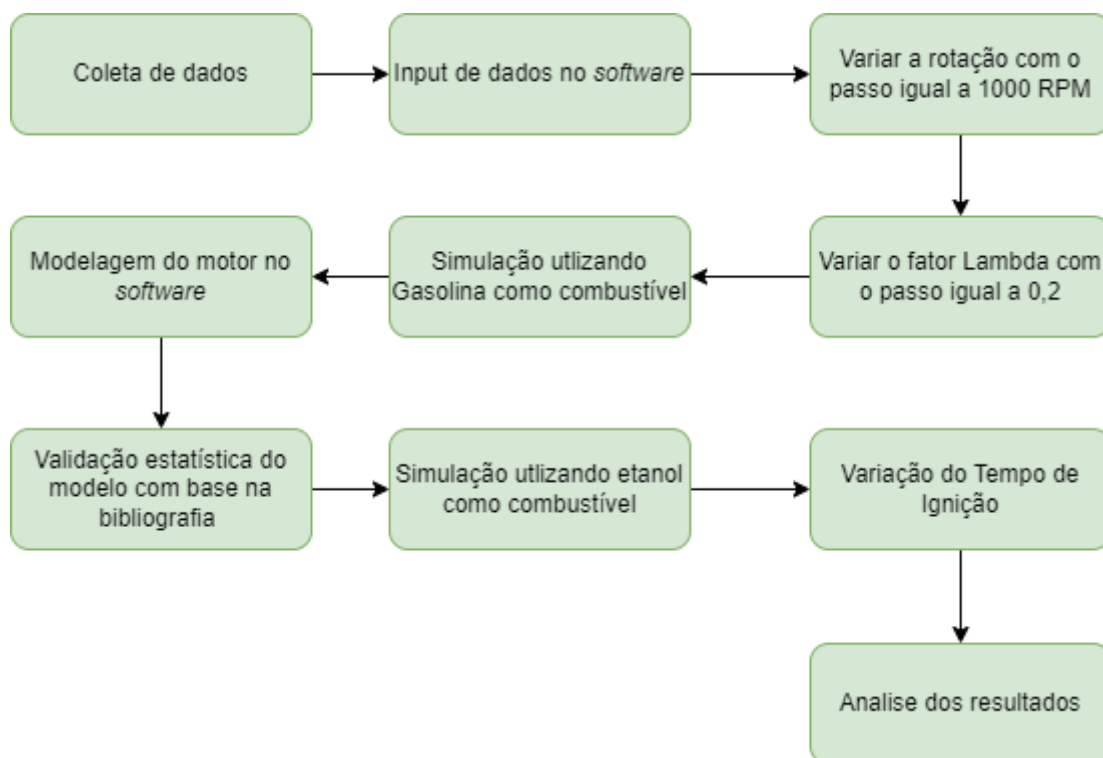


Figura 19: Fluxograma dos procedimentos da simulação no *software* Diesel RK.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Utilizando como parâmetro de validação estatística do modelo os valores da pressão média efetiva (BMEP) por rotação, faz-se a comparação entre os resultados de Abu-nada (2007) e o modelo desenvolvido neste trabalho, a partir da equação (43),

$$Precisão = \frac{BMEP_1(RPM)}{BMEP_2(RPM)} \quad (43)$$

3.3 Variáveis e Indicadores

Para Gil (2022), as variáveis são objetos de trabalho que podem ter seu valor ou classificação alterados, de forma que existam as variáveis de entrada, que são aquelas que são

obtidas, medidas ou observadas, e as de saída, que são o retorno que as variáveis de entrada produzem após um processo. Sua importância para a pesquisa é tal que, permitem o teste de hipóteses que relacionam diferentes aspectos do mundo natural e social.

De acordo com Walliman (2015), existe também o conceito de indicadores, que se refere a uma medida ou variável capaz de avaliar um fenômeno de forma quantitativa ou qualitativa. A seleção de um determinado indicador se dá pela sua capacidade de transparecer os principais aspectos da hipótese selecionada para a pesquisa.

Além disso, Vergara (2016), ao se ter os indicadores selecionados, é possível obter resultados mais fiéis ao processo observado. Walliman (2015, p.67) exemplifica que, “Conceitos de natureza abstrata podem ser difíceis de detectar, avaliar ou medir. Considere ‘ansiedade’, por exemplo. Como seria possível detectá-la em uma pessoa? A resposta é: procurar indicadores – fenômenos percebíveis que atestam a presença do conceito.”

Para maior precisão na obtenção de resultados faz-se a seleção de indicadores relacionados com os objetos de estudo da presente pesquisa e com suas variáveis de entrada já obtidas no processo de pesquisa bibliográfica. Na Tabela 2, são apresentados os principais indicadores para cada um dos principais objetos de estudos selecionados.

TABELA 2 - Variáveis e indicadores deste trabalho.

Variáveis	Indicadores
Motor de Combustão por Centelha	Pressão média efetiva
	Potência
	Torque
Etanol	Propriedades Físicas
	Propriedades Químicas

Fonte: Pesquisa direta (2023).

3.4 Instrumento e Coleta de Dados

Após o desenvolvimento da simulação, é feita a coleta de dados, obtendo uma base teórica para fundamentar a presente pesquisa. Dessa forma, a utilização de artigos, livros, dissertações e manuais faz-se necessária neste capítulo, uma vez que esta pesquisa é do caráter exploratório, quantitativo, qualitativo, experimental e bibliográfico.

Ademais, outro método de aquisição de dados será feito utilizando a simulação de um modelo de motor de combustão interna no *software* Diesel-RK, tendo o objetivo de analisar e comparar os resultados obtidos com os das principais fontes bibliográficas existentes.

3.5 Tabulação de Dados

Uma vez obtidos os dados da bibliografia é feita a simulação no *software Diesel-RK*, onde há a aquisição de todos os resultados do modelo proposto. Ademais, os resultados obtidos da simulação e das pesquisas bibliográficas são tabulados e analisados no *software Microsoft Excel* e no *Power BI*, a fim de facilitar a interpretação dos resultados a partir de filtragem e análise de dados.

3.6 Considerações Finais do Capítulo

Este capítulo tem o objetivo de explicitar as principais vertentes da presente pesquisa, tais como suas classificações, materiais, métodos, ferramentas e técnicas utilizadas, os quais facilitam o prosseguir da pesquisa e realizar as análises propostas.

No próximo capítulo, são apresentados os resultados obtidos através da simulação no *software Diesel-RK*, a fim de propiciar discussões sobre os dados obtidos ao longo da pesquisa.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da modelagem do motor e dos cálculos utilizando etanol obtidos através das simulações no *software* Diesel RK e consolidados por meio do mesmo programa e também pelo Excel. Além disso, é feita a comparação entre os resultados obtidos pelo *software* e os valores encontrados na bibliografia estudada.

4.1 Validação do Modelo do Motor

Primeiramente fez-se a coleta de dados utilizando como base para a simulação, os valores de configuração do motor considerados por Abu-Nada (2007), como se pode observar na Tabela 3,

TABELA 3 - Especificações operacionais e de motor usadas na simulação.

Combustível	C8H18
Taxa de compressão	8,3
Área do cilindro (m)	0,0864
Curso (m)	0,0674
Comprimento da biela (m)	0,13
Raio da manivela (m)	0,0337
Número de cilindros	1
Volume de folga (m ²)	5.41x10
Volume varrido (m ³)	3.95x10
Velocidade do motor (rpm)	2000-5000
Pressão de entrada (bar)	1
Razão de equivalência	1
Tempo de ignição	-25°BTDC
Duração da combustão	70°
Temperatura da parede (K)	400

Fonte: Adaptada de Abu-Nada (2007).

Outrossim, como mostra a equação (40) de Woschni (1967) modificada para HCCI por Assanis, o coeficiente de escala a_s é um fator essencial que requer ajustes para calibrar os modelos, de forma que tal termo precisa de ajustes específicos para cada novo motor. Além disso Abu-Nada (2007) constata que, a_s incorpora o impacto da carga e a intensidade do movimento e o determina como 3,26 em seu modelo.

Além disso, como se observa na Tabela 4, fez-se necessário a implementação de outros dados no *software*, que foram obtidos com base nas bibliografias de Momani (2017), Abu-Nada (2007), Demirce (2023) e Neshat (2014)

TABELA 4 - Variáveis de modelagem do motor.

Propriedades	Valores	Unidades
Transferência de Calor do motor		
Temperatura Média da Parede da Camisa do Cilindro na região do PMS do pistão	413	K
Refrigeração		
Tipo de sistema de refrigeração	Resfriamento Líquido	-
Espessura da casca fundida no sistema de refrigeração	0,01	mm
Conductividade térmica	2	W/(m*K)
Velocidade média do líquido refrigerante no sistema de arrefecimento do motor em condição de plena carga	1,5	m/s
Pressão da Água no sistema de refrigeração do motor	1,7	bar
Temperatura do líquido refrigerante do motor	363	K
Pistão e Aneis		
Temperatura Média da Parede do Pistão	400	K
Área efetiva do labirinto de aneis de pistão para simulação de Blow-by	1,86	mm ²
Número de aneis na zona	3	-
Número de aneis na zona II	0	-
Cabeçote do cilindro		
Temperatura Média da Parede da Cabeça do Cilindro	Calculado pelo <i>software</i>	-
Material da cabeça do cilindro	Ferro Fundido	-
Espessura Média da Parede do Cabeçote	6,05	mm
Atrito		
Coefficiente de atrito A	0,086	-
Coefficiente de atrito B	0,112	-

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Além disso, inclui-se os parâmetros de operação do motor no Diesel-RK, com base nas bibliografias de Abu-Nada (2007) e Demirce (2023) e adaptado aos valores de acordo com as limitações do *software*, como pode-se observar na Tabela 5.

TABELA 5 - Parâmetros operacionais do motor SI utilizados na simulação.

Variáveis	Valores	Unidades
Velocidade do motor	2000-6000	rpm
Razão de Equivalência de Combustível Ar no Cilindro	0,8; 1,0; 1,2;	-
Tempo de injeção/ignição	47,5	graus B.TDC
Pressão ambiente	1	bar
Temperatura ambiente	300	K
Perdas de pressão de entrada (antes do compressor)	-0,182	bar
Pressão diferencial no sistema de exaustão (cauda)	0,04	bar
Tempo de fornecimento de combustível	340	graus B.TDC
Duração do fornecimento de combustível	120	graus B.TDC

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Outrossim, os valores referentes às propriedades da gasolina, são obtidos diretamente da biblioteca de combustíveis do *software* Diesel-RK, que contempla as variáveis do combustível vinculadas à temperatura no injetor a 380 K.

Após a simulação do modelo proposto, obteve-se os seguintes resultados de BMEP, potência e torque, como mostra Figura 20.

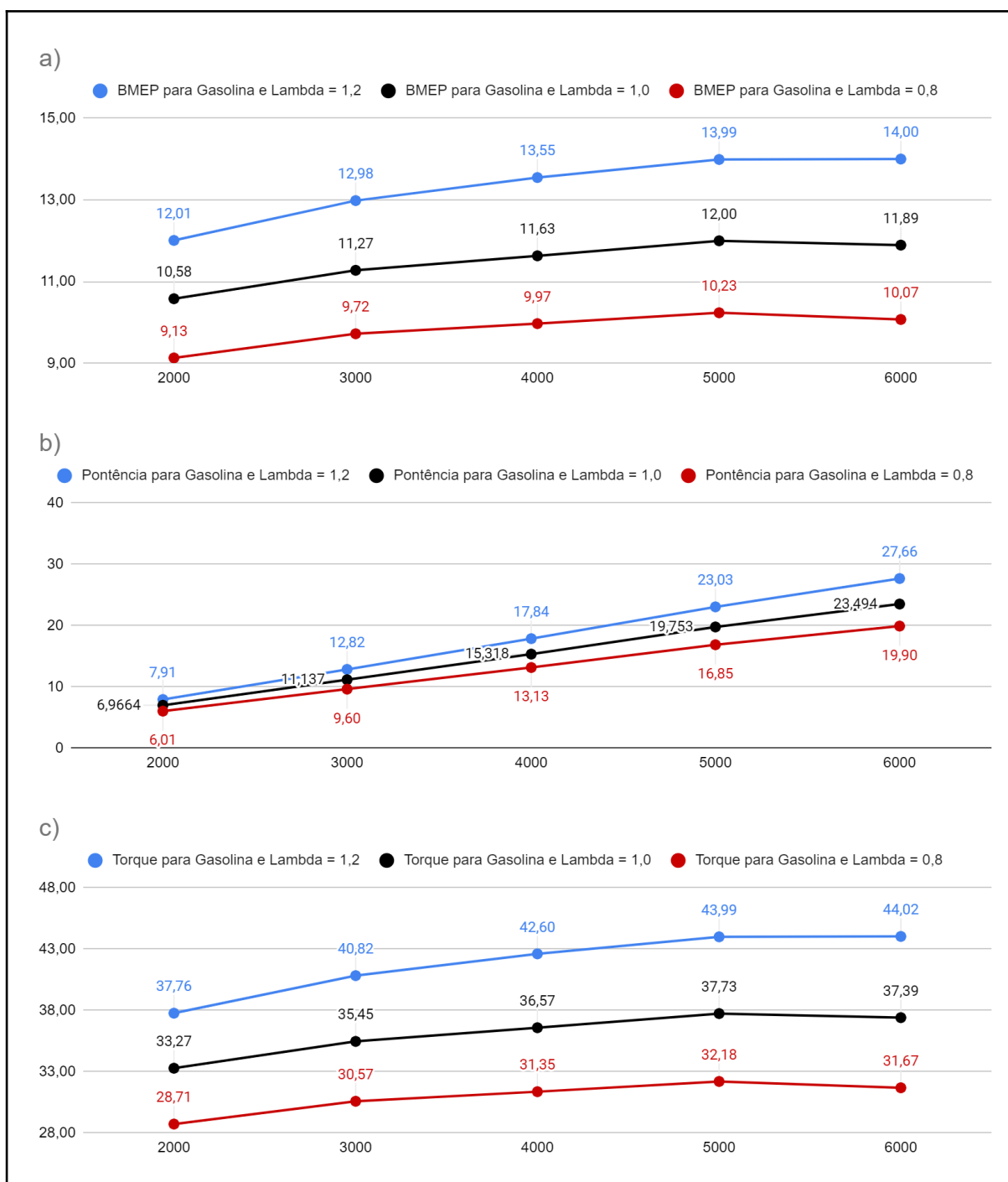


Figura 20: Resultados da simulação mostrando pressão média efetiva - BMEP (a), potência (b) e torque (c) em relação à rotação (rpm) do motor, com gasolina como combustível.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

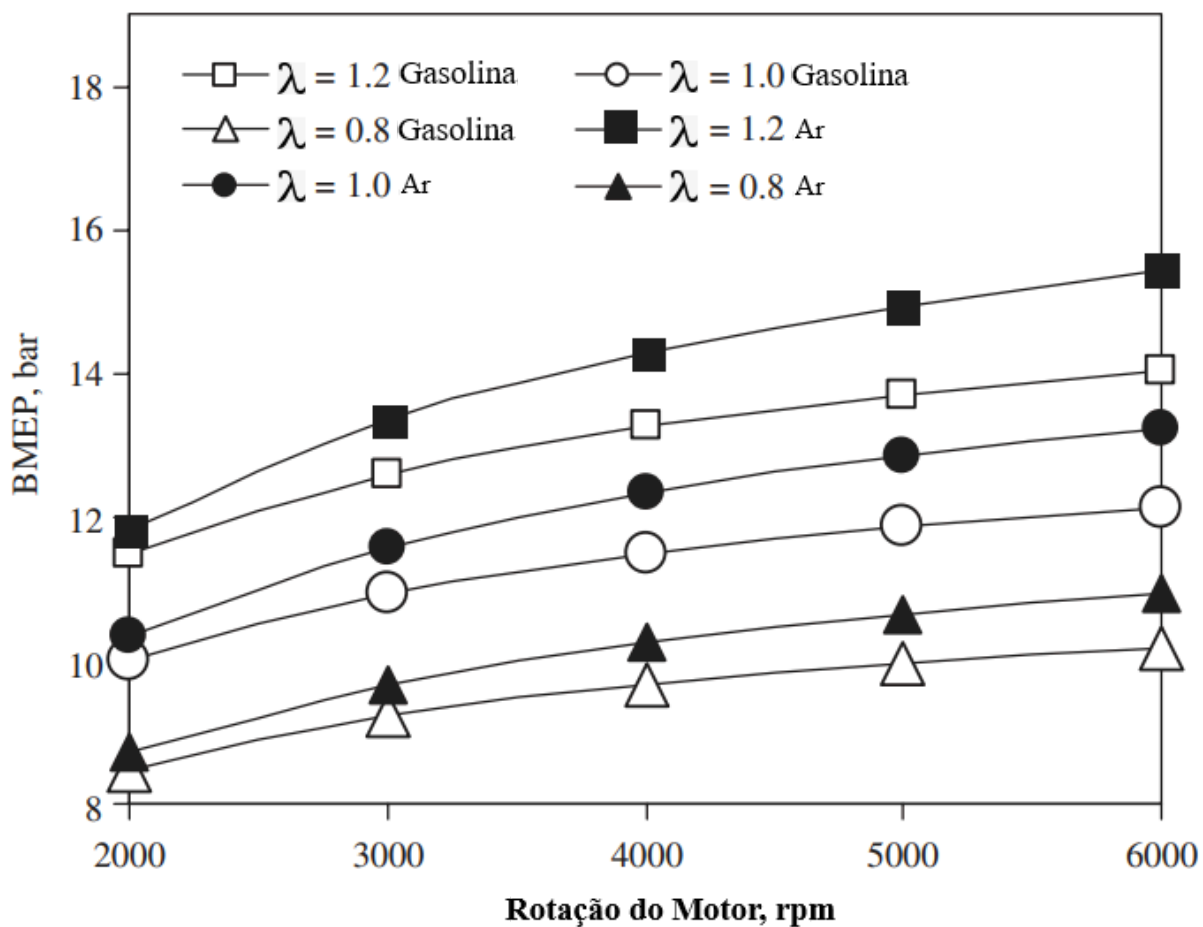


Figura 21: Pressão efetiva média do freio versus rotação do motor em diversas relações de equivalência usando ar e modelos de calor específicos da mistura.
Fonte: Adaptado de Abu-Nada (2007).

Além disso, os valores de BMEP da bibliografia foram obtidos por meio da semelhança geométrica com base na Figura 21.

Dessa forma, utilizando a equação (43), obteve-se as seguintes precisões para cada curva de BMEP por RPM, onde a relação Ar-Combustível para cada curva vale é $\lambda_1 = 0,8$, $\lambda_1 = 1,0$ e $\lambda_1 = 1,2$, como pode-se observar na Tabela 6.

TABELA 6 - Cálculo da precisão média para Lambda igual a 0,8; 1,0 e 1,2.

BMEP[bar] para $\lambda = 0,8$				
RPM	Modelo no Diesel-RK	Bibliografia	Acurácia	Acurácia Média do Modelo para Lambda = 0,8
2000	9,1279	8	87,64%	93,63%
3000	9,7199	9,05	93,11%	
4000	9,9685	9,375	94,05%	
5000	10,234	9,625	94,05%	
6000	10,070	10	99,30%	
BMEP[bar] para $\lambda = 1,0$				
RPM	Modelo no Diesel-RK	Bibliografia	Acurácia	Acurácia Média do Modelo para Lambda = 1,0
2000	10,578	10	94,54%	97,28%
3000	11,274	10,875	96,46%	
4000	11,629	11,4375	98,35%	
5000	11,997	11,75	97,94%	
6000	11,891	12	99,09%	
BMEP[bar] para $\lambda = 1,2$				
RPM	Modelo no Diesel-RK	Bibliografia	Acurácia	Acurácia Média do Modelo para Lambda = 1,2
2000	12,006	12	99,95%	98,87%
3000	12,981	12,6625	97,55%	
4000	13,546	13,3125	98,28%	
5000	13,988	13,7875	98,57%	
6000	13,999	14	99,99%	

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Nota-se que a maior precisão foi obtida para $\lambda = 1,2$, tendo uma precisão média de 98,87%, além disso destaca-se o alto valor obtido para a precisão nas rotações de 2000 e 6000 RPM.

4.2 Simulação do Motor Monocilindro com o uso de etanol

Uma vez consolidado o modelo do motor, fez-se a coleta de dados do etanol, utilizando os dados disponibilizados por Wang (2017), Silenghem (2013), Loyte (2022), Malla (2023) e Jin (2022), como referência. Utiliza-se o *site Engineering Toolbox*, para obter a capacidade térmica do combustível na temperatura do injetor, que é adotada como 380 K, como mostra a Tabela 7.

TABELA 7 - Propriedades do etanol.

Propriedades	Valor	Unidade
Molécula	C_2H_5OH	-
Fração de enxofre no combustível	0	%
Poder calorífico inferior	26,9	MJ/kg
Massa específica do combustível a 323 K	786,71	kg/m ³
Tensão superficial do combustível a 323 K.	0,0174	N/m
Viscosidade dinâmica do combustível a 323 K	0,000694	Pa.s
Calor Latente	838	kJ/kg
Capacidade térmica do combustível na temperatura do injetor	3470	J/(kg*K)
Massa molecular do combustível	46,068	-
Temperatura do combustível	380	K

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Após realizar a simulação, foram obtidos os resultados de pressão média efetiva(BMEP), potência e torque, conforme pode-se observar na Figuras 22.

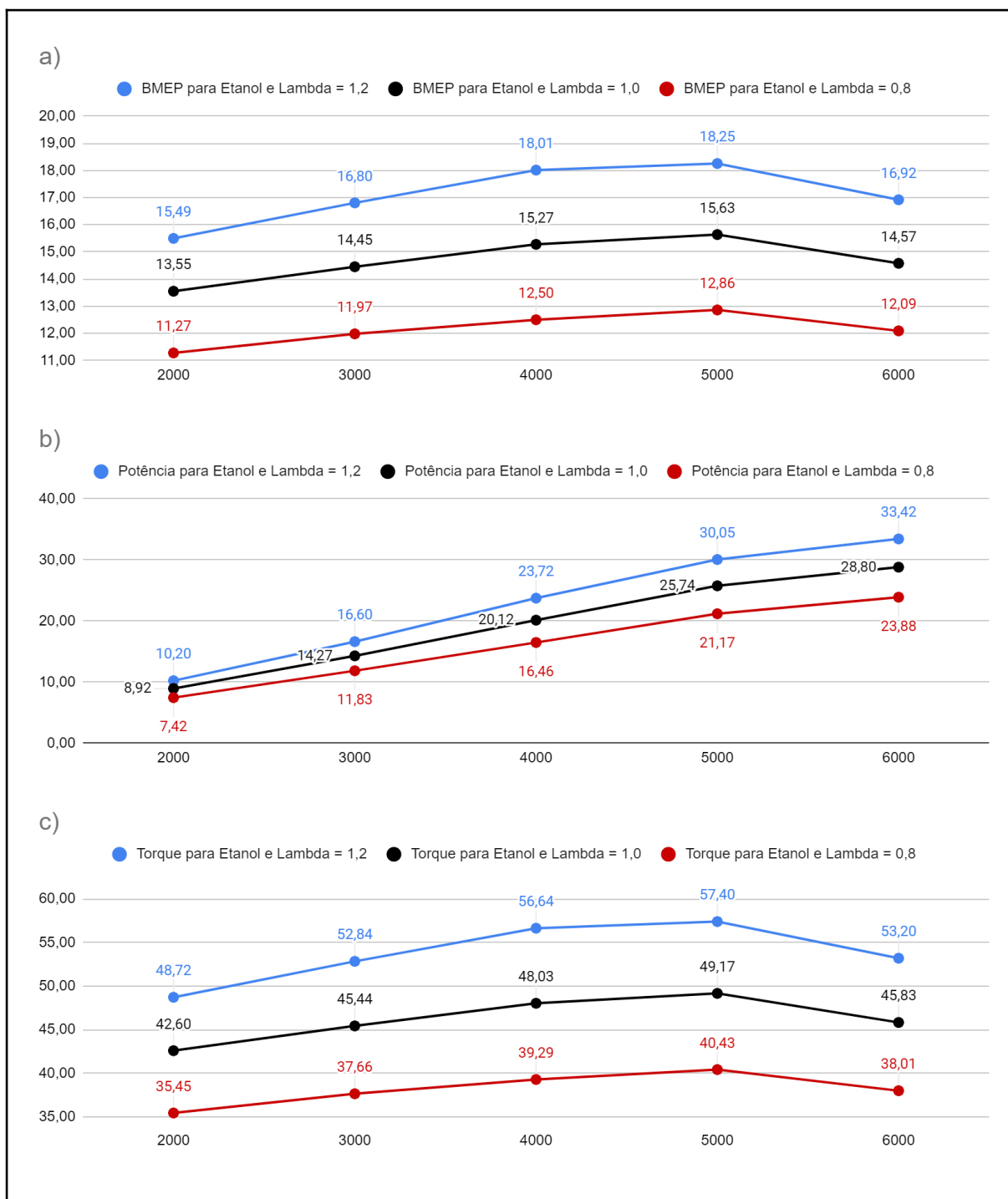


Figura 22: Resultados da simulação mostrando pressão média efetiva - BMEP (a), potência (b) e torque (c) em relação à rotação (rpm) do motor, com etanol como combustível.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Nota-se que na Figura 22 (a) que para o fator lambda igual a 0,8; 1,0 e 1,2, o BMEP tem como ponto máximo nas curvas o valor de 5000 RPM, tendo como valor máximo 18,252 bar, em seguida a pressão média efetiva decresce até 6000 RPM, representando uma perda no desempenho para essa faixa de operação. Para mais, conclui-se que esse aumento de pressão se deve, também, à quantidade de fluido que entra no cilindro de combustão, já que para um fator lambda igual a 1,2 é injetado mais combustível para a combustão.

Em seguida, na Figura 22 (b) observa-se para as três curvas um crescimento linear e constante até a rotação de 5000 RPM, apresentando um valor máximo de 30,051 kW. Após esse valor as curvas têm uma diminuição em sua inclinação, o que mostra uma evolução constante da potência produzida pelo motor até 5000 RPM e tendo seu pico em 6000 RPM. Além disso, nota-se que os valores obtidos para potência se relacionam com os valores de torque através da equação (2).

Observa-se, na Figura 22 (c), que para os fatores lambda de 0,8, 1,0 e 1,2, o torque atinge seu ponto máximo nas curvas a 5000 RPM, registrando um valor de 57,398 N.m, para lambda igual a 1,2. Posteriormente, o torque nas três curvas diminui até 6000 RPM, indicando uma redução no desempenho para essa faixa de operação. Além disso, nota-se que o torque é regido pela Equação (3) e o aspecto das curvas do gráfico (c) se assemelham ao gráfico (a), uma vez que o torque tem relação com a pressão média efetiva na Equação (13).

4.2.1 Variação dos parâmetros do motor com o etanol como combustível

A fim de aumentar o ganho de potência, torque e pressão média efetiva no motor por centelha utilizando o etanol como combustível, fez-se a variação no valor do tempo de ignição do combustível no motor, dentro do *software*. Em seguida, calcula-se o ganho em percentual por rotação e o ganho em percentual médio, para cada variável que se esperava o ganho e para $\lambda = 0,8$; $\lambda = 1,0$; $\lambda = 1,2$.

Ao examinar os dados da Tabela 8 referentes à pressão média efetiva, destaca-se que o ganho mais substancial ocorre para um fator lambda de 1,2, apresentando uma média de ganho de 21,22%. Esse ganho, ao ser analisado ao longo das rotações (de 2000 a 6000 RPM), diminui progressivamente, variando de 25,65% a 17,73% à medida que as rotações aumentam. Por outro lado, é observado que os ganhos médios para os fatores lambda 1,0 e 0,8 se aproximam de 9% em relação ao modelo que utiliza o tempo de ignição a 47,5°. Além

disso, observa-se que o maior valor obtido para BMEP é de 21,896 bar, na rotação de 5000 RPM, tempo de ignição a 20° e o fator lambda igual a 1,2.

TABELA 8 - Ganho da Pressão média efetiva [bar] variando o tempo de ignição com etanol como combustível.

Lambda = 1,2				
RPM	Tempo ignição a 47,5°	Tempo ignição a 20°	Ganho por rotação	Ganho Médio do Modelo para Lambda = 1,2
2000	15,492	19,466	25,65%	
3000	16,802	20,539	22,24%	
4000	18,010	21,796	21,02%	21,22%
5000	18,252	21,896	19,96%	
6000	16,916	19,915	17,73%	
Lambda = 1,0				
RPM	Tempo ignição a 47,5°	Tempo ignição a 20°	Ganho por rotação	Ganho Médio do Modelo para Lambda = 1,0
2000	13,545	15,025	10,93%	
3000	14,448	15,793	9,31%	
4000	15,273	16,607	8,73%	9,08%
5000	15,634	16,954	8,44%	
6000	14,574	15,768	8,19%	
Lambda = 0,8				
RPM	Tempo ignição a 47,5°	Tempo ignição a 20°	Ganho por rotação	Ganho Médio do Modelo para Lambda = 0,8
2000	11,272	12,446	10,42%	
3000	11,974	13,074	9,19%	
4000	12,495	13,573	8,63%	8,94%
5000	12,856	13,93	8,35%	
6000	12,085	13,081	8,24%	

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Nota-se na Tabela 9 que, para os três valores de lambda, 1,2; 1,0 e 0,8, aumentar a rotação de 2000 RPM para 6000 RPM resulta em um ganho médio de potência, sendo respectivamente de 20,37%, 8,78% e 8,69%. Observa-se uma tendência de redução no ganho

percentual de potência à medida que a rotação aumenta. Além disso, destaca-se como o maior valor de potência produzida como 39,349 kW com tempo de ignição a 20° e 6000 RPM, com o fator lambda igual a 1,2.

TABELA 9 - Ganho de Potência [kW] variando o tempo de ignição com etanol como combustível.

Lambda = 1,2				
RPM	Tempo ignição a 47,5°	Tempo ignição a 20°	Ganho por rotação	Ganho Médio do Modelo para Lambda = 1,2
2000	10,203	12,82	25,65%	
3000	16,599	20,291	22,24%	
4000	23,723	28,71	21,02%	20,37%
5000	30,051	36,052	19,97%	
6000	33,423	39,349	17,73%	
Lambda = 1,0				
RPM	Tempo ignição a 47,5°	Tempo ignição a 20°	Ganho por rotação	Ganho Médio do Modelo para Lambda = 1,0
2000	8,921	9,8953	10,93%	
3000	14,273	15,602	9,31%	
4000	20,118	21,875	8,73%	8,78%
5000	25,742	27,915	8,44%	
6000	28,796	31,154	8,19%	
Lambda = 0,8				
RPM	Tempo ignição a 47,5°	Tempo ignição a 20°	Ganho por rotação	Ganho Médio do Modelo para Lambda = 0,8
2000	7,424	8,197	10,41%	
3000	11,829	12,916	9,19%	
4000	16,458	17,879	8,63%	8,69%
5000	21,168	22,936	8,35%	
6000	23,878	25,846	8,24%	

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Observa-se na Tabela 10 que, para os três valores de lambda (1,2; 1,0 e 0,8), o aumento da rotação de 2000 RPM para 6000 RPM resulta em um ganho médio de torque,

sendo respectivamente de 21,22%, 9,08% e 8,94%. Há uma tendência de redução no ganho percentual de potência à medida que a rotação se aproxima de 6000 RPM. Destaca-se ainda o maior valor de torque, atingindo 68,859 N.m com tempo de ignição a 20° e 6000 RPM, com o fator lambda igual a 1,2.

TABELA 10 - Ganho de Torque [N.m] variando o tempo de ignição com etanol como combustível.

Lambda = 1,2				
RPM	Tempo ignição a 47,5°	Tempo ignição a 20°	Ganho por rotação	Ganho Médio do Modelo para Lambda = 1,2
2000	48,721	61,217	25,65%	
3000	52,840	64,593	22,24%	
4000	56,638	68,544	21,02%	21,22%
5000	57,398	68,859	19,97%	
6000	53,198	62,63	17,73%	
Lambda = 1,0				
RPM	Tempo ignição a 47,5°	Tempo ignição a 20°	Ganho por rotação	Ganho Médio do Modelo para Lambda = 1,0
2000	42,596	47,25	10,93%	
3000	45,435	49,665	9,31%	
4000	48,032	52,227	8,73%	9,08%
5000	49,167	53,317	8,44%	
6000	45,833	49,587	8,19%	
Lambda = 0,8				
RPM	Tempo ignição a 47,5°	Tempo ignição a 20°	Ganho por rotação	Ganho Médio do Modelo para Lambda = 0,8
2000	35,450	39,141	10,41%	
3000	37,657	41,116	9,19%	
4000	39,294	42,686	8,63%	8,94%
5000	40,430	43,808	8,36%	
6000	38,006	41,138	8,24%	

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Para mais, a partir das Figura 23 e 24, pode-se observar a comparação entre os valores de BMEP obtidos durante as simulações com diferentes tempos de ignição abrangendo os resultados absolutos e em porcentagem.

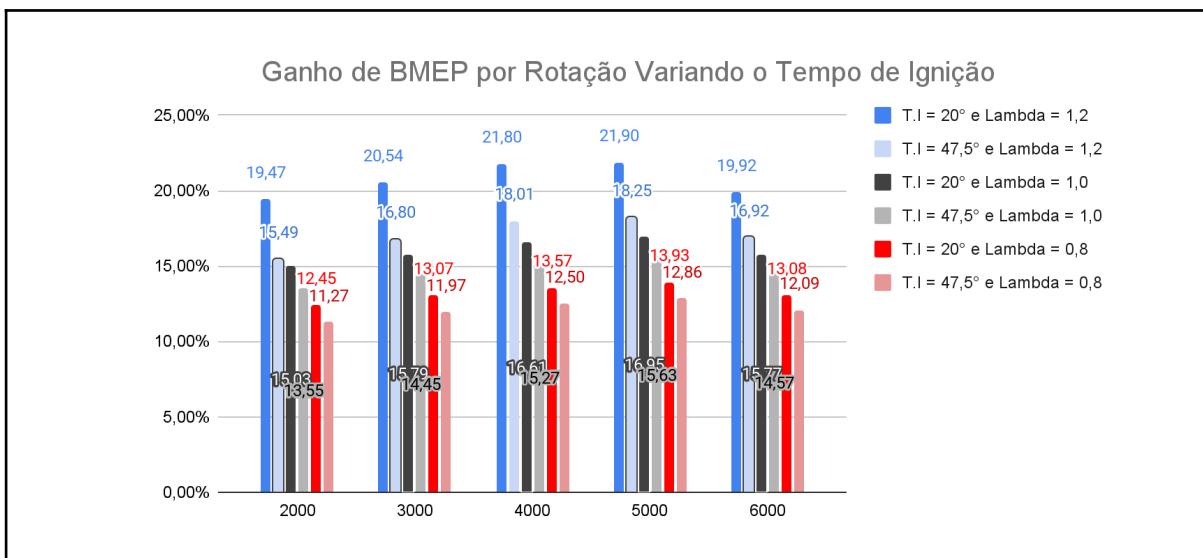


Figura 23: Ganho de BMEP pela Relação Ar-Combustível variando o tempo de ignição.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

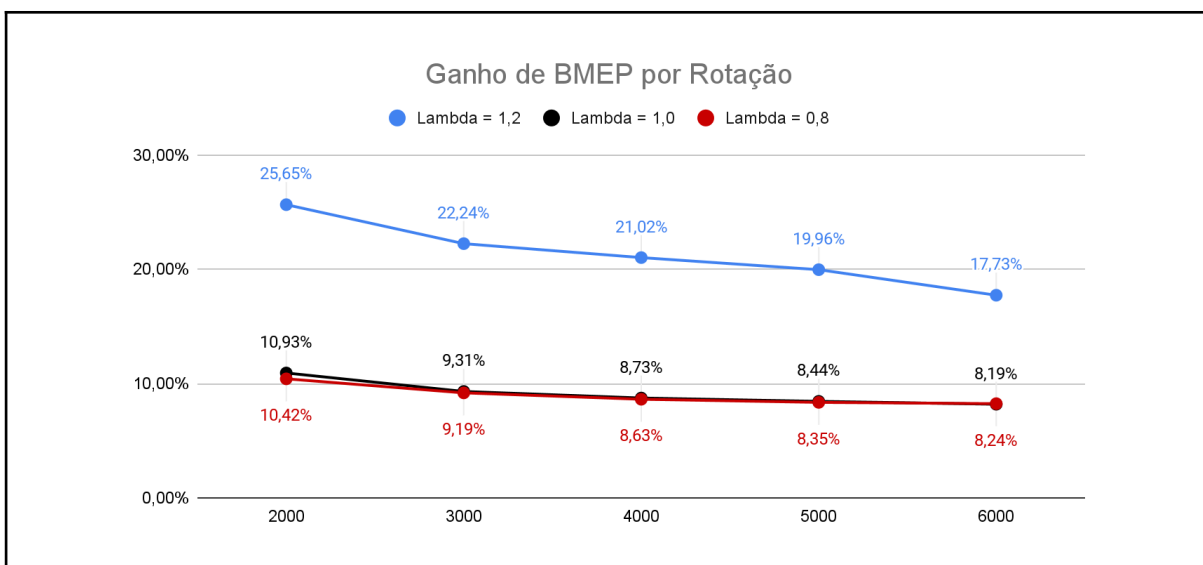


Figura 24: Ganho de BMEP pelo fator Lambda.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Nota-se que o maior valor obtido de BMEP no *software* é para o tempo de ignição igual a 20°, fator lambda igual 1,2 e 5000 RPM. Contudo o maior ganho de pressão média efetiva é dada entre os valores de 2000 RPM, com lambda igual a 1,2 e tempo de ignição 20° e 47,5°. Conclui-se observando a Figura 24, que lambda igual a 1,2 apresenta o maior ganho médio de BMEP, de forma que variando a rotação no motor, o ganho em relação às outras

curvas continua sendo aproximadamente duas vezes maior. Além disso, tem-se o maior ganho de BMEP igual a 25,65% para uma rotação de 2000 RPM.

Além disso, com base nas Figuras 25 e 26, é possível analisar a comparação dos valores de potência obtidos durante as simulações com diferentes tempos de ignição, apresentando tanto os resultados absolutos quanto em porcentagem.

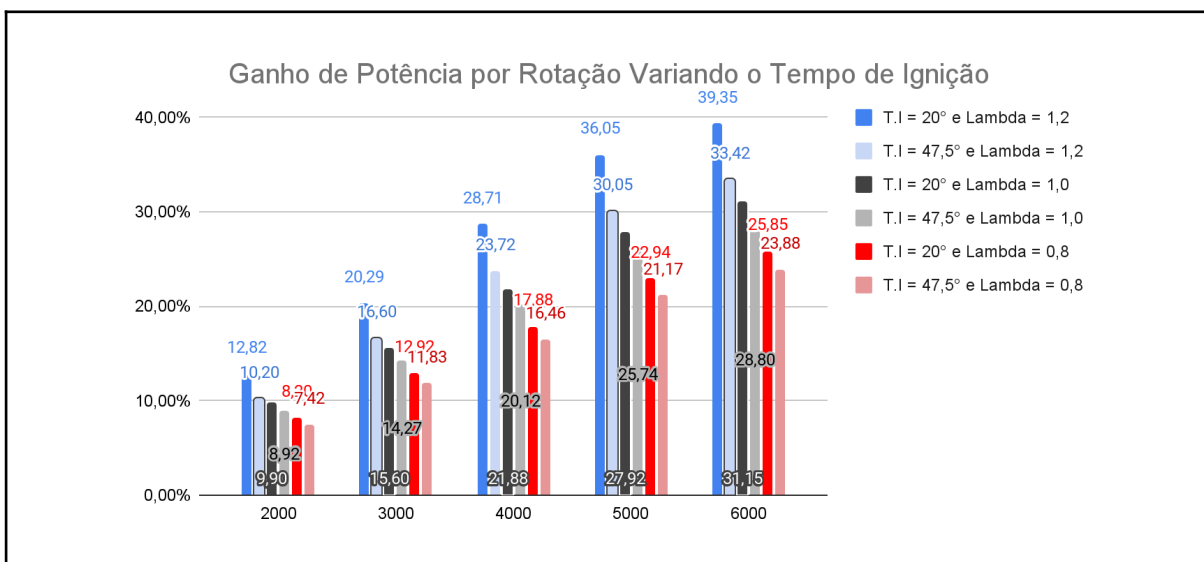


Figura 25: Ganho de Potência pela Relação Ar-Combustível variando o tempo de ignição.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

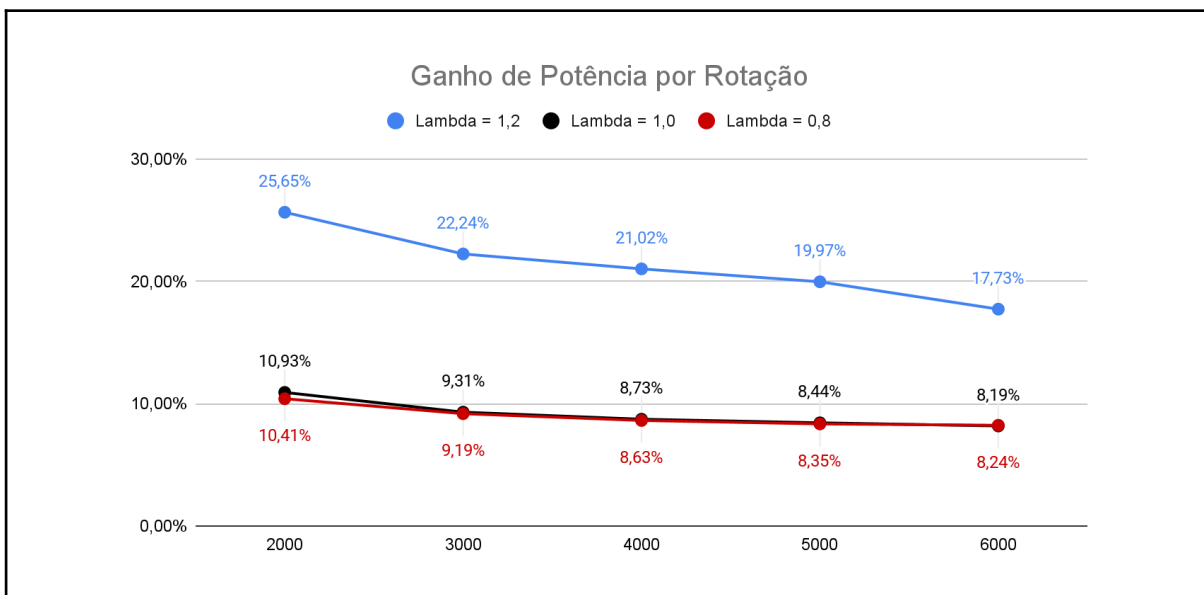


Figura 26: Ganho de Potência pelo fator Lambda.

Fonte: Pesquisa direta (2023).

Além disso, com base na Figura 25, é possível concluir que o valor mais elevado de potência obtido no Diesel-RK ocorre para o tempo de ignição igual a 20°, fator lambda igual a

1,2 e 6000 RPM. No entanto, o maior ganho de potência é observado entre os valores de 2000 RPM, com lambda igual a 1,2, e tempos de ignição de 20° e 47,5°. Ao analisar a Figura 26, conclui-se que um lambda igual a 1,2 proporciona o maior ganho médio de potência. Variações na rotação do motor mostram que o ganho em relação às outras curvas continua sendo aproximadamente duas vezes maior. Além disso, destaca-se o maior ganho de potência, alcançando 25,65% para uma rotação de 2000 RPM.

Com base nas Figuras 27 e 28, é possível realizar a comparação entre os valores de torque obtidos durante as simulações, abrangendo tanto os resultados absolutos quanto as variações percentuais.

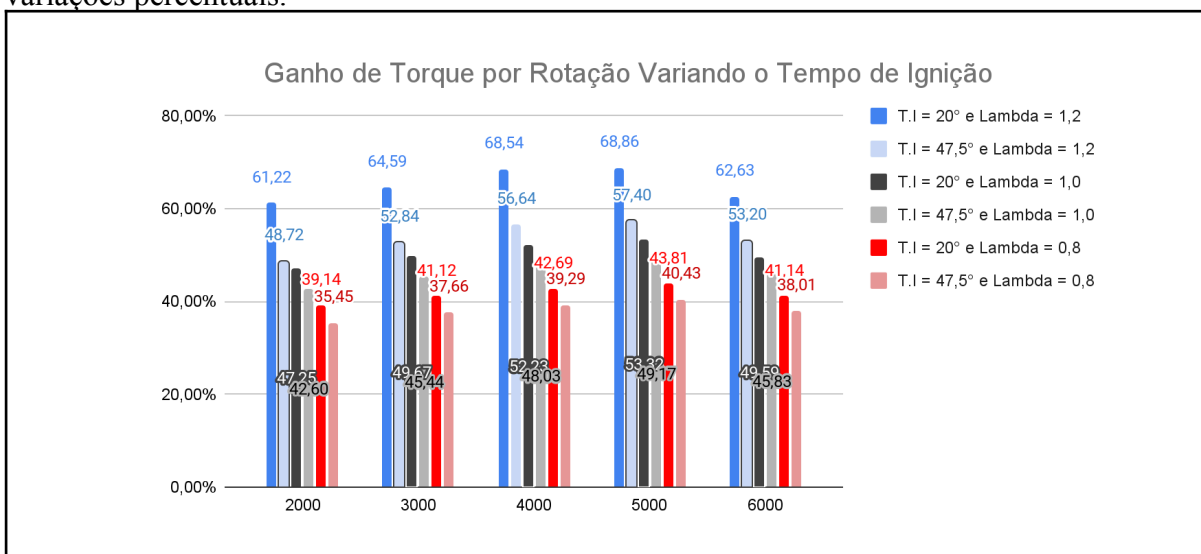


Figura 27: Ganho de Torque pela Relação Ar-Combustível variando o tempo de ignição.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

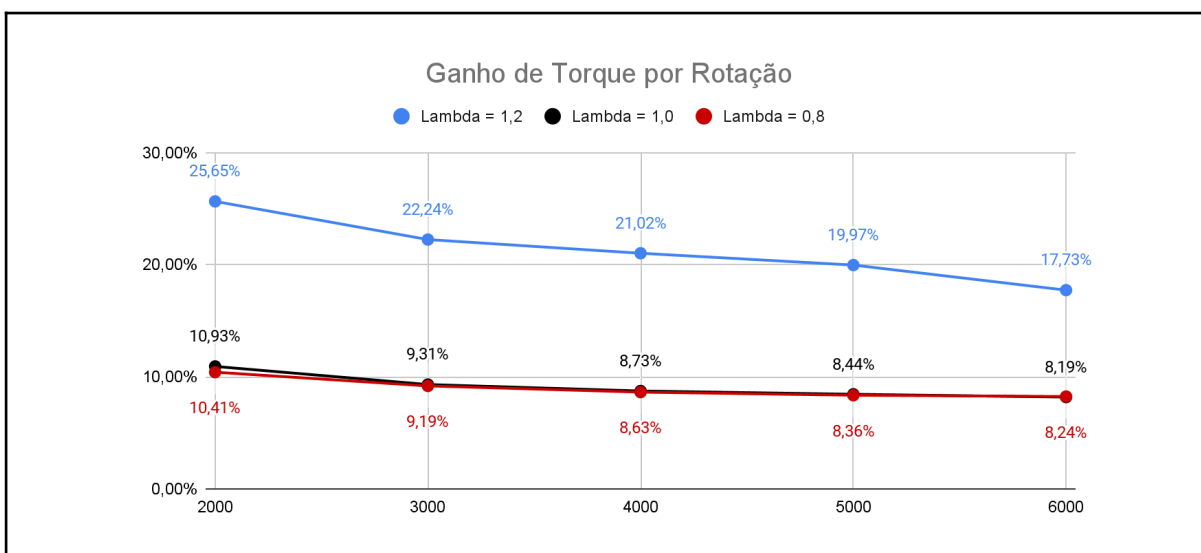


Figura 28: Ganho de Torque pelo fator Lambda.
Fonte: Pesquisa direta (2023).

Finalmente, com referência à Figura 27, pode-se inferir que o torque mais alto registrado no Diesel-RK ocorre quando o tempo de ignição é fixado em 20° , com um fator lambda de 1,2 e 5000 RPM. Similarmente às demais análises das figuras, o maior aumento de potência é identificado entre os valores de 2000 RPM, com lambda igual a 1,2, e tempos de ignição de 20° e $47,5^\circ$.

Ao concluir a análise da Figura 28, verifica-se que, semelhante às curvas de BMEP e potência, o lambda igual a 1,2 resulta no maior ganho médio de torque. Variações na rotação do motor demonstram que o ganho em relação às outras curvas permanece aproximadamente duas vezes maior. Além disso, nota-se o maior ganho de torque, atingindo 25,65% para uma rotação de 2000 RPM.

5 CONCLUSÃO

Neste capítulo, é feita a conclusão deste trabalho com base nos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento das simulações pelo *software* Diesel RK e em comparação aos valores obtidos nas bibliografias de referência. Além disso, são propostos os principais tópicos para seguimento de trabalhos futuros.

5.1 Conclusão do Trabalho

Ao longo dos anos, a energia se consolidou como um elemento indispensável no cotidiano da sociedade, destacando-se a preocupação com os malefícios ambientais associados ao uso de fontes não renováveis. Nesse contexto, o etanol tem sido objeto de extensos estudos em várias regiões do mundo, buscando sua aplicação como combustível exclusivo para veículos com eficiência substancial.

O setor automobilístico, por sua vez, tem dedicado esforços consideráveis ao desenvolvimento de tecnologias e ferramentas inovadoras, visando a criação de veículos mais potentes e ágeis. Para isso, a adoção crescente de simulações analíticas destaca-se tanto em grandes indústrias quanto em pesquisas acadêmicas, já que *softwares*, como o Diesel RK, possibilitam modelagens adaptáveis a ambos os ambientes de desenvolvimento tecnológico.

A partir da pesquisa realizada, torna-se possível responder a pergunta problema, uma vez que é conduzida a análise do desempenho de um motor de combustão interna por centelha alimentado por etanol utilizando o *software* Diesel RK.

Os resultados obtidos satisfizeram o objetivo geral do trabalho, que consiste na avaliação técnica do comportamento do etanol em um motor de combustão interna de ignição por centelha e também contribuem para ganhos de desempenho, conforme verificado por meio do *software* Diesel-RK.

Este estudo assume predominantemente uma abordagem bibliográfica, fundamentando-se na consolidação da base teórica através da análise de trabalhos prévios. Além disso, caracteriza-se como pesquisa exploratória, ao propor uma metodologia para otimizar o desempenho de motores de combustão interna movidos a etanol. Adotando uma abordagem mista, o trabalho incorpora elementos quantitativos e qualitativos, onde os valores

de desempenho são obtidos por meio de simulações e subsequentemente comparados com dados de um modelo encontrado na literatura.

Ao variar os ângulos correspondentes do tempo de ignição do combustível no motor de combustão por centelha monocilindro, é possível notar que o ganho das três características (potência, torque e pressão média efetiva) avaliadas em relação ao motor descrito na bibliografia de Abu-Nada (2007), é maior quando se tem o fator $\lambda = 1, 2$.

Além disso, no modelo desenvolvido percebe-se que os valores obtidos de pressão média efetiva e torque diminuem a partir da rotação de 5000 RPM. Isso se deve ao motor não queimar todo o combustível que é injetado no cilindro, uma vez que as altas rotações atrapalham o processo de queima devido a cinética de combustão do combustível.

Desse modo, pode-se concluir que é possível analisar o desempenho de um motor de combustão interna por centelha abastecido a etanol usando o *software* Diesel RK, por meio da variação do tempo de ignição do combustível. Além disso, destaca-se a possibilidade da obtenção de ganhos de desempenho no motor utilizando o etanol como combustível, propiciando a maior viabilidade do uso do biocombustível e a redução da emissão de gases poluentes na atmosfera.

5.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a análise da margem de tempo de ignição que o *software* permite, a fim de refinar os valores adaptados da bibliografia e aumentar a aderência dos valores do motor da simulação ao motor de referência.

Outrossim, é possível aprofundar o presente trabalho na teoria de relevância das perdas de pressão antes do compressor do motor, visto que esta variável influencia diretamente nos valores que o *software* gera de pressão média efetiva (BMEP). Por fim, sugere-se que seja feito o refinamento do modelo do motor de referência, para que seja possível o aumento da precisão do modelo proposto.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2009. *E-book*. ISBN 9788580551280. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580551280/>. Acesso em: 20 fev. 2023.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2013. *E-book*. ISBN 9788580552010. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580552010/>. Acesso em: 20 dez. 2022.

OSA, Aldo. **Processos de Energias Renováveis**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2014. *E-book*. ISBN 9788595152045. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595152045/>. Acesso em: 20 dez. 2022.

CHAPRA, Steven C.; CANALE, Raymond P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2016. *E-book*. ISBN 9788580555691. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555691/>. Acesso em: 20 dez. 2022.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**. [Digite o Local da Editora]: Editora Blucher, 2018. *E-book*. ISBN 9788521212942. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521212942/>. Acesso em: 20 dez. 2022.

Turns, Stephen R. *Introdução à Combustão*. Disponível em: Minha Biblioteca, (3rd edição). Grupo A, 2013.

CORTEZ, Luís Augusto B. **Proálcool 40: Universidades e Empresas: 40 Anos de Ciência e Tecnologia para o Etanol Brasileiro**. [Digite o Local da Editora]: Editora Blucher, 2016. *E-book*. ISBN 9788521210634. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521210634/>. Acesso em: 19 dez. 2022.

DELGADO, José; RIBEIRO, Carlos. **Arquitetura de Computadores, 5ª edição**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2017. *E-book*. ISBN 9788521633921. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521633921/>. Acesso em: 20 dez. 2022.

COELHO, João Carlos M. **Energia e Fluidos: termodinâmica**. [Digite o Local da Editora]: Editora Blucher, 2016. *E-book*. ISBN 9788521209461. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521209461/>. Acesso em: 20 dez. 2022.

FARAH, Marco A. **O Petróleo e seus Derivados**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2012. *E-book*. ISBN 978-85-216-2151-5. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2151-5/>. Acesso em: 20 dez. 2022.

DOS SANTOS, Marco Aurélio. **Fontes de Energia Nova e Renovável**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2013. E-book. ISBN 978-85-216-2474-5. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2474-5/>. Acesso em: 20 dez. 2022.

HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin. **Energia e meio ambiente**. [Digite o Local da Editora]: Cengage Learning Brasil, 2014. E-book. ISBN 9788522116881. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522116881/>. Acesso em: 22 jan. 2023.

FILIPPO, Guilherme Eugênio Filho. **Máquinas Térmicas Estáticas e Dinâmicas - 1ª edição - 2014**. [Digite o Local da Editora]: Editora Saraiva, 2014. E-book. ISBN 9788536530758. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536530758/>. Acesso em: 22 jan. 2023.

DONATO, Vitório. **Logística para a Indústria do Petróleo, Gás e Biocombustíveis**. [Digite o Local da Editora]: Editora Saraiva, 2012. E-book. ISBN 9788536517865. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536517865/>. Acesso em: 16 fev. 2023.

BUDYNAS, Richard; NISBETT, J K. **Elementos de Máquinas de Shigley**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2016. E-book. ISBN 9788580555554. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555554/>. Acesso em: 17 fev. 2023.

FIALHO, Arivelto B. **Cosmos - Plataforma CAE do SolidWorks**. [Digite o Local da Editora]: Editora Saraiva, 2009. E-book. ISBN 9788536518992. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536518992/>. Acesso em: 18 fev. 2023.

MOREIRA, José Roberto S. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2021. E-book. ISBN 9788521636816. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636816/>. Acesso em: 23 fev. 2023.

SMITH, J M.; NESS, H. C V.; ABBOTT, M.M; et al. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2019. E-book. ISBN 9788521636854. Disponível em:

<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521636854/>. Acesso em: 23 fev. 2023.

PHILIPPI, Arlindo; REIS, Lineu Belico dos. **Energia e sustentabilidade**. [Digite o Local da Editora]: Editora Manole, 2016. *E-book*. ISBN 9786555761313. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555761313/>. Acesso em: 23 fev. 2023.

BOTH, Josemere; MENDES, Cláudia L.; MALHEIROS, Felipe C N.; et al.

Termodinâmica avançada. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2018. *E-book*. ISBN 9788595026094. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595026094/>. Acesso em: 23 fev. 2023.

WALLIMAN, Nicholas. **Métodos de Pesquisa**. Editora Saraiva, 2015. *E-book*. ISBN 9788502629857. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788502629857/>. Acesso em: 24 fev. 2023

GRAY, David E. **Pesquisa no mundo real. (Métodos de pesquisa)**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2011. *E-book*. ISBN 9788563899293. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788563899293/>. Acesso em: 24 fev. 2023.

GIL, Antonio C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2022. *E-book*. ISBN 9786559771653. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786559771653/>. Acesso em: 24 fev. 2023.

CRESWELL, John W.; CLARK, Vicki L P. **Pesquisa de métodos mistos. (Métodos de pesquisa)**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2013. *E-book*. ISBN 9788565848411. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788565848411/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

COOPER, Donald; SCHINDLER, Pamela. **Métodos de Pesquisa em Administração**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2016. *E-book*. ISBN 9788580555738. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580555738/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

VERGARA, Sylvia C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**, 16ª edição. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2016. *E-book*. ISBN 9788597007480. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597007480/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

TEIXEIRA, Gerson P.; MALHEIROS, Felipe Costa N. **Máquinas térmicas**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2018. *E-book*. ISBN 9788595025660. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595025660/>. Acesso em: 25 fev. 2023.

- ZAVALHIA, Lisiane S.; MARSON, Isabele Cristiana I.; RANGEL, Juliana O. **Biotecnologia**. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2018. E-book. ISBN 9788595026698. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595026698/>. Acesso em: 25 fev. 2023.
- ONU. **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 06 Outubro 2023.
- KULESHOV, Andrey. **Desenvolvimento De Métodos De Cálculo E Otimização Processos De Trabalho De Motor De Combustão Interna**. 2021. Disponível em: <https://diesel-rk.com/Eng/index.php?page=Publ>. Acesso em: 16 Outubro 2023.
- WOSCHNI, G. (1970). **A determinação das perdas de parede e do estresse térmico dos componentes de motores a diesel**. MTZ, 12, 491-499.
- KULESHOV, A.S. (1986). **Cálculo e seleção experimental de parâmetros para o processo de trabalho de um motor de combustão interna combinado de média velocidade de 4 tempos: Tese de doutorado para o grau de Candidato em Ciências Técnicas**. Moscou: Universidade Técnica Estadual de Moscou (MVTU), 124 páginas.
- VYRUBOV, D.N., Orlin, A.S. e Kruglov, M.G. (1983). **Motores de Combustão Interna: Teoria de Motores de Pistão e Combinados**. Moscou: Mashinostroenie, 372 páginas.
- SIMPSON, A.E., Kaminsky, A.I. e Morgulis, P.S. (1976). **Sobrealimentação de Motores a Diesel de Alta Velocidade**. Leningrado (atualmente São Petersburgo): Mashinostroenie, 288 páginas.
- VIBE, I.I. (1962). **Novas Perspectivas no Ciclo de Trabalho de Motores**. Moscou: Mashgiz, 272 páginas.
- STEPHENSON, P.W. e Rutland, C.J. (1995). **Modelando os efeitos das características do fluxo de entrada na combustão de motores a diesel**. SAE Technical Paper Series, N 950282, 57-67.
- VODKI, Rumka. **Jovem abastecendo o carro no posto de gasolina, uma ilustração vetorial**. 2023. Disponível em: https://br.freepik.com/vetores-premium/jovem-abastecendo-o-carro-no-posto-de-gasolina-uma-ilustracao-vetorial_17640063.htm. Acesso em: 27 Outubro 2023.
- PETRICHENKO R.M. **Método semi empírico para calcular o fluxo de radiação em motores de combustão interna // Engenharia de motores**. - 1979. - No 3. - P. 24-25.
- ROSENBLITH G.B. **Troca de calor em motores a diesel**. - Moscou: Engenharia Mecânica, 1977. - 216 p.

PAVLICHENKO A.M., Zhukov V.P. **Troca de calor em motores de média velocidade, como o 6CHN 25/34, CHN 26/34, 6CHN 36/45, CHN 62/64.** Trabalhos do Instituto de Engenharia Naval (Nikolaev). - 1976. - Edição 118. - P. 95-101.

PAVLICHENKO A.M., Zhukov V.P. **Análise de cálculo da função de transferência de calor nos parâmetros do ciclo de trabalho do motor.** Trabalhos do Instituto de Engenharia Naval (Nikolaev). - 1975. - Edição 100. - P. 103-107.

IBRAIM, Heron. **Ethanol-Water Mixtures as a Promising Fuel Alternative for Reducing Harmful Emissions in Spark Ignition Engine.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), dezembro de 2023. Disponível em: <https://eventos.abcm.org.br/cobem2023/>. Acesso em: 01 Novembro 2023.

LOYTE, A., Suryawanshi, J., Bhiogade, G., Devarajan, Y., Subbiah, G., 2022, **Recent developments in utilizing hydrous ethanol for diverse engine technologies**, Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, Vol. 177, pp. 108985.

MENDIBURU, A. Z., Lauermann, C. H., Hayashi, T. C., Mariños, D. J., Costa, R. B. R., Coronado, C. J. R., Roberts, J. J., Carvalho Jr., J. A., 2022, **Ethanol as a renewable biofuel: Combustion characteristics and application in engines**, Energy, Vol. 257, pp. 124688.

SAVELENKO, V. D., Ershov, M. A., Kapustin, V. M., Chernysheva, E. A., Abdellatief, T. M. M., Makhova, U. A., Makhmudova, A. E., Abdelkareem, M. A., Olabi A.G., 2022, **Pathways resilient future for developing a sustainable E85 fuel and prospects towards its applications**, Science of The Total Environment, Vol. 844, pp.157069

FERGUSON C, Kirkpatrick A. 2001. **Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences.** Wiley: New York.

ABU-Nada, E. I. Al-Hinti, B. Akash and A. Al-Sarkhi, **Thermodynamic analysis of spark-ignition engine using a gas mixture model for the working fluid**, Int. J. Energy Res. 31 (2007), 1031–1046.10.1002/er.1296

WOSCHNI G. 1967. **Universally applicable equation for the instantaneous heat transfer coefficient in internal combustion engine.** SAE Paper No. 670931.

MOMANI, Waleed. **Influence of Internal Combustion Engine Parameters on Gas Leakage through the Piston Rings Area.** Scientific Research Publishing, [S.l.], v. 9, n. 2, p.

122-135, fev. 2017. Disponível em: [\<https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=74431>\](https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=74431). Acesso em: 13 dez. 2023.

DEMIRCI, Abdurrahman. **Estimation of the shape factor (m) in Wiebe function at different operating conditions for a SI engine**. International Journal of Automotive Engineering and Technologies, [S.l.], v. 12, n. 3, p. 112-125, set. 2023. Disponível em: [\<https://dergipark.org.tr/en/pub/ijaet>\](https://dergipark.org.tr/en/pub/ijaet). Acesso em: 07 dez. 2023.

NESHAT, Elaheh. **Effect of different heat transfer models on HCCI engine simulation**. Science Direct, [S.l.], v. 70, p. 598-607, jul. 2014. Disponível em: [\<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414007146>\](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414007146). Acesso em: 10 dez. 2023.

JIN, Chao. **Preparation and properties analysis of ethanol/furan-derivative/diesel alternative microemulsion fuel**. Science Direct, [S.l.], v. 415, p. 122235, jun. 2022. Disponível em: [\<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382022002235>\](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382022002235). Acesso em: 13 dez. 2023.

MALLA, Laxman Kumar. **Thermal performance comparison of flat plate pulsating heat pipes of different material thermal conductivity using ethanol-water mixtures**. Science Direct, [S.l.], v. 230, p. 115041, set. 2023. Disponível em: [\<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123015041>\](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431123015041). Acesso em: 13 dez. 2023.

SILEGHEM, L. **Performance and emissions of iso-stoichiometric ternary GEM blends on a production SI engine**. Science Direct, [S.l.], v. 127, p. 161-170, set. 2013. Disponível em: [\<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113008867>\](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236113008867). Acesso em: 13 dez. 2023.

WANG, Chongming. **Ethanol blends in spark ignition engines: RON, octane-added value, cooling effect, compression ratio, and potential engine efficiency gain**. Science Direct, [S.l.], v. 212, p. 389-404, jan. 2017. Disponível em: [\<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917300946>\](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917300946). Acesso em: 13 dez. 2023.

ENGINEERING TOOLBOX. **The Engineering Toolbox**. Disponível em: <<https://www.engineeringtoolbox.com/>>. Publicado em: 2001. Acesso em: 15 dez. 2023.

Martins, F. G. (2000). **Simulation and Optimisation of Atmospheric and Vacuum Distillations of a Lube Plant**. Science Direct. LEP/E, Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570794600800620>. Acesso em: 18 de dezembro de 2023.

Geissler, C. H. (2024). **The future of biofuels in the United States transportation sector**. Science Direct. Department of Chemical and Biological Engineering, Princeton University, Princeton, NJ, 08544, USA. Disponível em: <https://sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123011346>. Publicado em março de 2024. Acesso em: 18 de dezembro de 2023.

Thamilarasan, J. **Sustainability Improvement of Ethanol Blended Gasoline Fuelled Spark Ignition Engine by Nanoparticles**. Journal of Nanomaterials, [S.l.], v. 2022, p. 7793947. Disponível em: <https://downloads.hindawi.com/journals/jnm/2022/7793947.pdf?_gl=1*wl6l3h*_ga*MTIyNzE3OTMwNy4xNzA2NjYxNDM5*_ga_NF5QFMJT5V*MTcwNjY2MTQzOS4xLjAuMTcwNjY2MTQzOS42MC4wLjA.&_ga=2.219871833.139973201.1706661439-1227179307.1706661439>. Acesso em: 30 jan. 2024. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto de Pesquisa e Tecnologia Vel Tech Rangarajan Dr. Sagunthala, Chennai, Índia. 3 jun. 2022.

Badawy, T. (2024). **Performance and emissions evaluation of a multi-cylinder research engine fueled with ethanol, methanol, gasoline Euro-6, E85, and iso-stoichiometric ternary GEM mixtures operated at lean conditions**. Science Direct. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623612400108X>. Clean Combustion Research Center, King Abdullah University of Science and Technology, Thuwal 23955, Arábia Saudita.

Turner, D. (2011). **Combustion performance of bio-ethanol at various blend ratios in a gasoline direct injection engine**. Science Direct. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623611000685X>. Escola de Engenharia Mecânica, Universidade de Birmingham, B15 2TT, Reino Unido.

DINESH, M.H. **Experimental investigation of variable compression ratio and ignition timing effects on performance, combustion, and Nox emission of an ammonia/hydrogen-fuelled Si engine.** Mangalore: Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Karnataka, Surathkal, 14 June 2023. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923025879>>. Acesso em: 30 Janeiro 2024.

OLIVEIRA, Tiago Luis. **Análise energética, exergética e experimental em um motor de combustão interna usando como combustível os fluidos do processo de pirólise assistida por micro-ondas.** Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Universidade Estadual de Minas Gerais, agosto de 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/328388584_Tese_de_Doutorado>. Acesso em: 30 Janeiro 2024.

YUN, Hongli. **Optimization of fuel injection timing and ignition timing of hydrogen fueled SI engine based on DOEMPGA.** Zhengzhou: School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, 27 December 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922057846>>. Acesso em: 30 Janeiro 2024.

BAUER, Wolfgang; WESTFALL, Gary D.; DIAS, Helio. **Física para Universitários.** [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2012. E-book. ISBN 9788580550955. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580550955/>. Acesso em: 02 fev. 2024.

ANEXO