

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ITAJUBÁ – FEPI

Curso de Engenharia Mecânica

Gabriel José Silva Procópio

**ESTUDO TÉCNICO E COMPARATIVO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO
INTERNA OPERANDO COM GÁS DE SÍNTESE PRODUTO DA
GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA, GNV E GASOLINA**

ITAJUBÁ

2024

Gabriel José Silva Procópio

**ESTUDO TÉCNICO E COMPARATIVO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO
INTERNA OPERANDO COM GÁS DE SÍNTESE PRODUTO DA
GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA, GNV E GASOLINA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica do Centro
Universitário de Itajubá–FEPI como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Túlio André Paiva

Coorientador: Prof. Dr. André Silva Chaves

ITAJUBÁ

2024

Procópio, G. J. S.

Estudo técnico e comparativo um motor de Combustão interna operando com gás de síntese produto da gaseificação da biomassa, GNV e gasolina. Gabriel José Silva Procópio. Itajubá, 2024.

69 p.

Orientador (a): Prof. Dr. Túlio André Paiva.

Coorientador (a): Prof. Dr. André Silva Chaves.

Trabalho de Conclusão de Curso. Engenharia Mecânica. Centro Universitário de Itajubá – FEPI.

PAIVA, T. A. FEPI–Centro Universitário de Itajubá. Título: Estudo técnico e comparativo um motor de Combustão interna operando com gás de síntese produto da gaseificação da biomassa, GNV e gasolina.

Ata de Apresentação do trabalho de conclusão do curso de Engenharia Mecânica

Centro universitário de Itajubá- FEPI

Em sessão às 18 horas do dia 11 de junho de 2024 o acadêmico **GABRIEL JOSÉ SILVA PROCÓPIO** apresentou o Trabalho de Conclusão de Curso, intitulado **“ESTUDO TÉCNICO E COMPARATIVO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA OPERANDO COM GÁS DE SÍNTESE PRODUTO DA GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA, GNV E GASOLINA”** como requisito para conclusão do Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário de Itajubá – FEPI perante a Banca Examinadora. Depois de todas as considerações feitas, o candidato foi considerado:

Aprovado

Aprovado com Restrições ()

Reprovado ()

Gabriel José Silva Procópio
Acadêmico

Assinatura

Prof. Dr. Túlio André Paiva
Orientador

Assinatura

Prof. Dr. André Silva Chaves
Coorientador

Assinatura

Prof. Dr. Marcio de Oliveira
Arguidor 1

Assinatura

Prof. Me. Thiago Gonçalves De Oliveira
Arguidor 2

Assinatura

“Confia ao SENHOR as tuas obras,
e os teus desígnios serão estabelecidos.”

(Provérbios, 16:3)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me conduzido durante esses 5 anos de formação. Minha família, meus pais Rosa Maria da Silva Procópio e José Claudio Procópio, meu irmão Luiz Cláudio Silva Procópio e minha noiva, e futura esposa, Carla Danielly Silva Miranda, por todo apoio durante minha formação, conselhos, incentivos, carinho, amor e principalmente por estarem comigo nas conquistas e nas derrotas. Aos meus professores, em nome do meu orientador Dr. Túlio André Paiva e coorientador Dr. André Silva Chaves, por me auxiliarem, acompanharem e extraírem o melhor de mim nessa jornada que se encerra. De modo especial, também agradeço ao professor Dr. Tiago Mendes, da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, por me ceder o tema deste trabalho e por todo auxílio prestado. Ao Centro Universitário de Itajubá – FEPI, de modo especial a todos os funcionários, que há 60 anos moldam profissionais de sucesso. Por fim, aos meus colegas e amigos de sala por dividirem seu tempo comigo e compartilhar bons momentos que sempre serão lembrados.

RESUMO

Anualmente, por conta do Brasil ser um país cuja economia é sustentada pelo setor primário, são geradas na ordem de milhões de toneladas de resíduos agroindustriais. Para solucionar o problema da disposição final desses rejeitos e a futura escassez do petróleo essa biomassa possui o potencial de ser utilizada como matéria prima para a produção de energia por meio de processos termoquímicos, tornando-se um combustível. Esse combustível alternativo, por sua vez, pode ser utilizado em motores de combustão interna regidos a ciclo Otto. Por essa razão, esse trabalho tem como objetivo realizar um estudo comparativo entre combustíveis já difundidos (a gasolina e o gás natural veicular) e o gás de síntese, produto da gaseificação da biomassa. Para o desenvolvimento desse estudo comparativo foi realizado uma metodologia de análise de um motor de combustão interna operando em ciclo Otto onde se obteve alguns parâmetros térmicos e mecânicos do motor utilizando os três diferentes tipos de combustível. Foi identificado, portanto, que o gás de síntese, obteve resultados superiores aos demais combustíveis.

Palavras-chave: Motor de combustão interna, gás de síntese, modelo termodinâmico.

ABSTRACT

Annually, due to Brazil, being a country, whose economy is supported by the primary sector, millions of tons of agro-industrial waste are generated. To solve the problem of the final disposal of these wastes and the future scarcity of oil, this biomass has the potential to be used as a raw material for the production of energy through thermochemical processes, becoming a fuel. This alternative fuel, in turn, can be used in internal combustion engines governed by the Otto cycle. For this reason, this work aims to carry out a comparative study between already widespread fuels (gasoline and natural gas for vehicles) and synthesis gas, a product of biomass gasification. To develop this comparative study, a methodology was carried out to analyze an internal combustion engine operating in an Otto cycle, where some thermal and mechanical configurations of the engine were obtained using the three different types of fuel. It was therefore identified that synthesis gas obtained better results than other fuels.

Keywords: Internal combustion engine, synthesis gas, thermodynamic model.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Mundial em 2021.....	1
Figura 2 - Matriz Energética brasileira em 2022	1
Figura 3 - Tipos de motores Stirling - A (beta), B (beta) e C (gama).....	5
Figura 4 - Ciclo real e ideal do ciclo termodinâmico Stirling.....	6
Figura 5 – Motor a vapor e seus componentes	7
Figura 6 - Esquema de um motor alternativo por ignição à centelha	9
Figura 7 – Os quatro tempos do motor Wankel.....	10
Figura 8 - Motor de impulso: turbojato.....	11
Figura 9 - (A) Motor de Ignição Espontânea (Diesel), (B) Motor de combustão por faísca ou centelha	12
Figura 10 - Os Quatro tempos de um motor alternativo ciclo Otto	13
Figura 11 - Os dois tempos de um motor alternativo ciclo Otto.....	14
Figura 12 - Configuração dos motores multicilindros: (1) Em linha, (2) Em V, (3) Radial, (4) Cilindros Opostos, (5) Em U, (6) Pistão Opostos.....	15
Figura 13 - Representação das aletas de um motor arrefecido a ar.....	17
Figura 14 - Esquema de um motor arrefecido a água	17
Figura 15 - Sistema de acionamento de válvulas.....	18
Figura 16 – Representação esquemática da classificação segundo ao diâmetro x curso.....	19
Figura 17 – Ciclo Otto teórico	22
Figura 18 - Classificação de Combustíveis Segundo a Fase e Modo de Obtenção.	28
Figura 19 - Processo termoquímico de gaseificação da biomassa.....	33
Figura 20 - As quatro etapas básicas do processo de gaseificação da biomassa.	34
Figura 21 - Processo de transesterificação.....	36
Figura 22 - As três etapas da metodologia do estudo	37
Figura 23 - Gráfico: Consumo específico de combustível x RM	47
Figura 24 - Gráfico: Potência efetiva x consumo específico de combustível.....	48
Figura 25 - Gráfico: Potência efetiva x RM.....	48

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Poderes caloríficos de combustíveis derivados do petróleo	31
Tabela 2 - Parâmetros adotados pertinentes para o motor operando com gasolina, GNV e gás de síntese	38
Tabela 3 - Resultado obtidos	47

LISTAS DE SÍMBOLOS

MCE = Motor de combustão externa

MCI = Motor de combustão interna

FA = Fluido Ativo

PMS = Ponto morto superior

TDC = *Top-dead-center*

PMI = Ponto morto inferior

BDC = *Bottom-dead-center*

TAI = Temperatura de autoignição

4T = Quatro tempos

2T = Dois tempos

RPM = Rotações por minuto

T_c = Temperatura da fonte fria

Q_c = Calor rejeitado para fonte fria

Q_{1q} = Quantidade de calor

Q_h = Calor recebido da fonte quente

T_h = Temperatura da fonte quente

$V_{máx}$ = Volume máximo

$V_{mín}$ = Volume mínimo

Q_1 = Calor gerado

Q_2 = Calor cedido

W_{cicl} = Energia mecânica

(\overline{RM}_e) = Relação ar-combustível em base molar estequiométrica

RM_e = Relação ar-combustível em base mássica estequiométrica

RM = Relação ar-combustível em base mássica

λ = Coeficiente de excesso de ar

\dot{m}_{comb} = Vazão mássica de combustível

\dot{m}_{ar} = Vazão mássica de ar

\dot{m}_{gases} = Vazão mássica de gás de síntese

PCI = Poder calorífico inferior do combustível

W_{term} = Potência térmica

W_{efet} = Potência efetiva

W_{ind} = Potência indicada

η_{tef} = Rendimento térmico efetivo

η_{ind} = Rendimento indicado

η_{mec} = Rendimento mecânico

SUMÁRIO

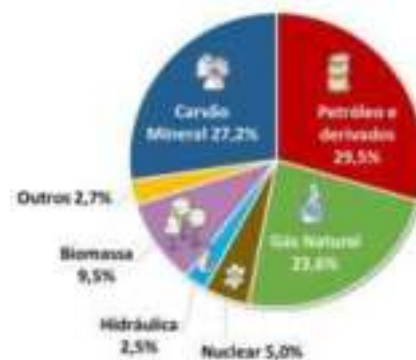
1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Justificativa	3
1.2	Objetivos.....	3
	<i>1.2.1 Objetivo geral</i>	3
	<i>1.2.2 Objetivos específicos.....</i>	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Motores de combustão externa (MCE).....	5
2.2	Motores de combustão interna (MCI)	8
2.3	Classificações dos motores de combustão interna alternativos.....	11
	2.3.1 Método de ignição.....	12
	2.3.2 Número de tempos do ciclo de operação	13
	2.3.3 Alimentação de combustível	14
	2.3.4 Disposição dos cilindros	15
	2.3.5 Sistema de arrefecimento.....	16
	2.3.6 Válvulas de admissão e exaustão.....	18
	2.3.7 Alimentação de ar.....	18
	2.3.8 Diâmetro e curso do pistão	19
	2.3.9 Rotação do Virabrequim	20
	2.3.10 Estado físico do combustível	21
2.4	Ciclo Otto	21
2.5	Parâmetros de avaliação de um motor de combustão interna	23
	2.5.1 Relação ar-combustível.....	23
	2.5.2 Vazão mássica de combustível e ar	24
	2.5.3 Potência Efetiva	25
	2.5.4 Potência Térmica.....	26

2.5.5 Potência indicada.....	26
2.5.6 Rendimento mecânico	27
2.6 Combustíveis.....	27
2.7 Combustão.....	29
2.8 Poder Calorífico.....	30
2.9 Gasolina comum	31
2.10 Gás Natural Veicular (GNV).....	31
2.11 Gás de Síntese	32
3 METODOLOGIA	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5 CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

O petróleo tem uma participação significativa no mundo que abrange desde a sua produção, consumo, reservas, impactos econômicos e influências nas relações internacionais. Sendo assim, percebe-se que o petróleo desempenha um papel central tanto na economia mundial quanto como fonte energética. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA) o petróleo e seus derivados como pode ser observado na Figura 1 representavam na matriz energética mundial 29,5% em 2021 (Alvarenga e Dantas, 2020).

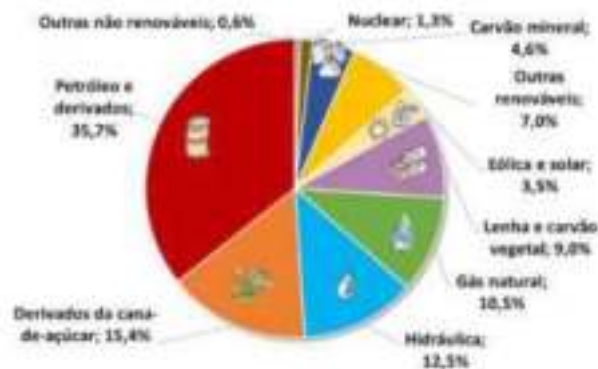
Figura 1 - Matriz Energética Mundial em 2021.



Fonte: EPE, 2023.

No Brasil, em 2022, segundo o BEN (balanço energético nacional) de 2023 produzido pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética) a matriz energética brasileira apresentou 35,7% para petróleo e seus derivados conforme apresentado na Figura 2. Em complemento, atualmente, o petróleo e seus derivados representam 93% da matriz de transporte. Reforçando ainda mais a importância desta fonte energética para o mundo e para o Brasil (Alvarenga e Dantas, 2020).

Figura 2 - Matriz Energética brasileira em 2022



Fonte: BEN, 2023

Levando em consideração que este recurso é limitado e não renovável faz-se necessário a busca por outras fontes de energias alternativas capazes de substituir o petróleo e seus derivados não somente no que tange a escassez, mas também na questão de poluentes atmosféricos.

Considerando então a visão de substituição dos combustíveis derivados do petróleo, pode-se dizer que existem na literatura específica, diversas frentes de estudo buscando novos combustíveis alternativos para realizar a substituição.

Portanto, este trabalho propõe realizar um estudo comparativo (metodologia de análise) entre três diferentes tipos de combustíveis. A gasolina comum, o gás natural veicular (GNV) e um terceiro combustível alternativo, o gás de síntese, produto da gaseificação da biomassa. Essa comparação irá permitir dados importantes do comportamento de um motor convencional dada as diferentes características entre os combustíveis citados.

Os combustíveis derivados do petróleo, tais como a gasolina e o GNV possuem sua utilização bastante difundida e conhecida em máquinas térmicas e possuem maior poder calorífico na ordem de 46,536 (MJ/kg) e 52,255 (MJ/kg) respectivamente, conforme Santos (2018).

Por outro lado, os gases de síntese, ou seja, gases provenientes da queima incompleta de combustíveis, apresentam as mais diferentes composições químicas e conseqüentemente variados poderes caloríficos. A grande maioria desses gases de sínteses, por serem gerados a partir da combustão incompleta de determinados tipos de combustíveis, acabam por possuir uma quantidade de energia armazenada ou poder calórico baixo na ordem de 4 (MJ/kg) a 6 (MJ/kg) quando comparado com os combustíveis tradicionais (Rocha *et al*, 2022).

Isso se deve, segundo Basu (2013), pois parte dos elementos combustíveis desses gases de sínteses foram queimados (oxidados) e parte desses elementos não sofreram a queima propriamente dita, ficando à disposição para novas queimas. Mas como partes desses elementos combustíveis foram queimados a quantidade de energia armazenada nesses gases de sínteses fica reduzida.

Por conta dessa baixa quantidade de energia armazenada, ou baixo poder calorífico armazenado e a disponibilidade e/ou produção, sua utilização e aceitação não é difundida (Franco e Mendes 2021). No entanto, esses gases podem ser advindos de alguns processos produtivos como produção de carvão vegetal e cocção por exemplo, geram uma quantidade significativa de gases de síntese. Também é possível obter tais gases utilizando a gaseificação da biomassa. Tratando-se de Brasil, esta opção torna-se atrativa pois são geradas na ordem de milhões de toneladas de resíduos por ano (Alves, 2016; Costa, 2018; Almeida, 2020).

Será avaliado, portanto, neste trabalho a eficiência e a viabilidade térmica de um motor de combustão interna regido a ciclo Otto, para isso, será importante no decorrer desse trabalho explicar os tipos de combustíveis em questão e o que vem a ser o motor de combustão e a participação desses combustíveis em seu funcionamento. Sendo assim, propõe-se avaliar a relação ar-combustível, quantidade de ar, potência térmica gerada (trabalho do virabrequim), consumo específico, potência indicada e rendimento térmico e mecânico.

Será necessário então, neste trabalho, a escolha e definição dos principais parâmetros de avaliação de desempenho de um motor de combustão interna Ciclo Otto, tendo em vista que estes parâmetros serão avaliados pela variação dos três combustíveis propostos tanto na quantidade quanto nos tipos.

Com os indicadores de desempenho supracitados, será apresentado todos os cálculos térmicos e desdobramentos relacionados aos tipos de combustíveis e seus respectivos consumos no motor ciclo Otto, sendo possível assim, apontar com os resultados o melhor desempenho para cada situação proposta.

1.1 Justificativa

Segundo Santos (2018), a poluição gerada pelos combustíveis originados do petróleo é bastante significativa. O tráfego de veículos contribuiu para cerca de 85% da quantidade de monóxido de carbono (CO) do meio ambiente. Portanto, tanto os problemas ambientais causados pelos combustíveis originários do petróleo quanto sua futura escassez por se tratar de uma fonte não-renovável e limitada fomentam estudos para buscar fontes alternativas de energia.

No mundo, especialmente no Brasil, ocorre grande rejeição de materiais e compostos que podem ser aproveitados como combustíveis. Por esta razão, faz-se importante o estudo da viabilidade do gás de síntese produto da gaseificação da biomassa alvo desta análise em motores de combustão interna.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Apresentar a influência da diversificação de combustíveis tais como gasolina, GNV e gás de síntese produto da gaseificação da biomassa, nos parâmetros de desempenho térmicos de um motor de combustão interna regido pelo ciclo Otto.

1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar os diferentes tipos de combustíveis propostos com respectivos cálculos e valores de poder calorífico;
- Apresentar o processo de obtenção e utilização do gás de síntese produto da gaseificação da biomassa proposto no trabalho como combustível;
- Comparar os indicadores de desempenho baseado na mudança dos combustíveis;
- Analisar termicamente os diferentes resultados de desempenho obtidos
- Definir qual a melhor utilização do gás de síntese baseado em seus valores de poder calorífico e quantidade de combustível consumidos para gerar potência térmica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

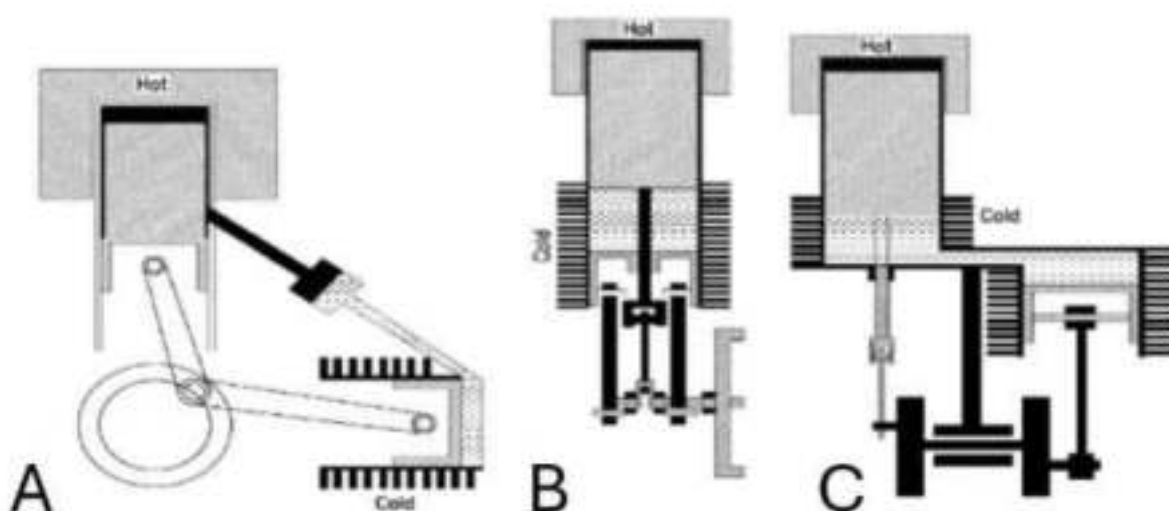
Neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica deste trabalho. Sendo que inicialmente foi abordado a máquina térmica, neste caso, o motor. Foram apresentados, portanto, os motores de combustão externa e os motores de combustão interna envolvendo suas classificações e particularidades. Em seguida, apresenta-se o ciclo Otto e os parâmetros de avaliação de um motor de combustão interna. Por fim, há uma introdução aos combustíveis utilizados em motores de combustão interna, a combustão e ao poder calorífico finalizando com a apresentação dos três combustíveis que foram abordados neste trabalho.

2.1 Motores de combustão externa (MCE)

Os Motores de combustão externa (MCE), conforme Çengel e Boles (2006), são máquinas (dispositivos térmicos) que convertem energia térmica proveniente da queima de combustível em energia mecânica, mas diferentemente dos motores de combustão interna, a combustão ocorre fora do cilindro onde ocorre o trabalho mecânico. Pode-se citar como exemplo a máquina a vapor e o motor Stirling.

Existem três tipos de motores Stirling (alfa, beta e gama) ilustrados na Figura 3. O motor tipo alfa é composto por dois cilindros independentes, já o beta é composto de apenas um cilindro com dois pistões em linha e por fim, o motor gama é composto também por dois cilindros independentes (de Oliveira e Moreira, 2023).

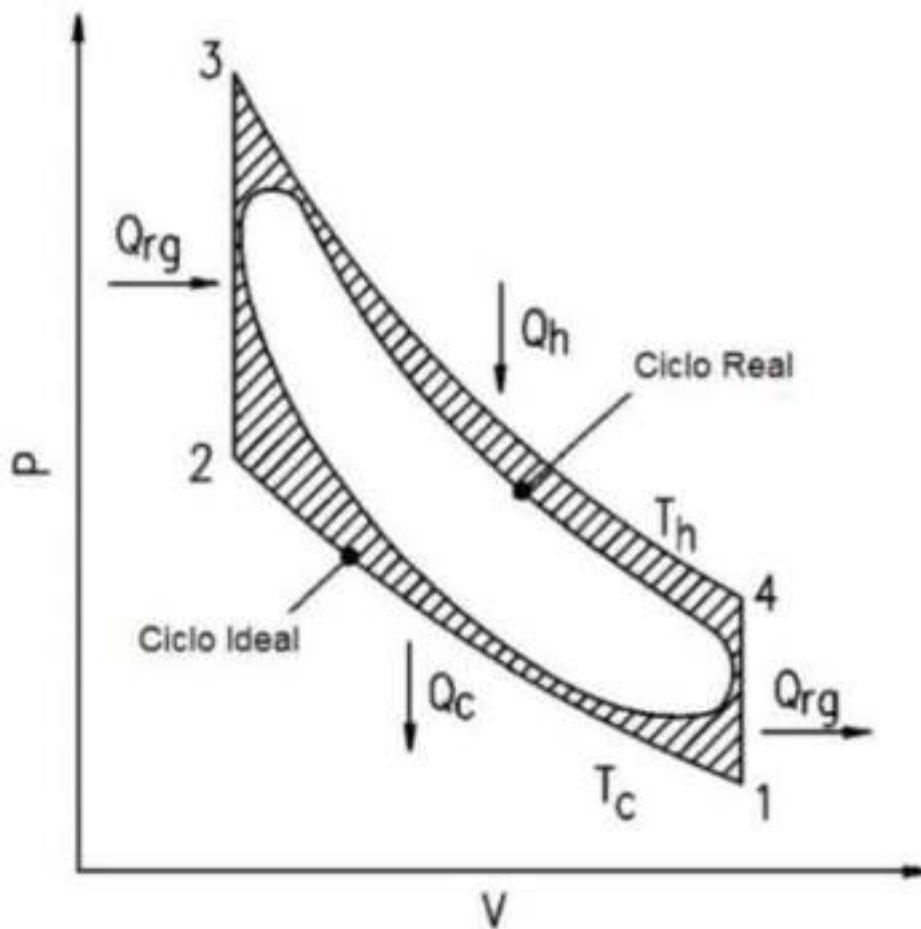
Figura 3 - Tipos de motores Stirling - A (beta), B (beta) e C (gama).



Fonte: de Oliveira e Moreira, 2023 (adaptado).

Conforme apresentado na Figura 4, segundo Oliveira e Moreira (2023), esses motores operam com base no ciclo termodinâmico Stirling, que envolve a compressão, aquecimento, expansão e resfriamento de um gás (geralmente hélio ou hidrogênio) em um ciclo fechado. A área hachurada representa o ciclo ideal. O ciclo ideal é uma representação simplificada do ciclo real, onde as irreversibilidades são negligenciadas, e todos os processos são considerados reversíveis (Pautz, 2013).

Figura 4 - Ciclo real e ideal do ciclo termodinâmico Stirling.



Fonte: de Oliveira e Moreira, 2023.

Portanto, segundo de Oliveira e Moreira (2023), o ciclo termodinâmico se dá conforme as seguintes etapas:

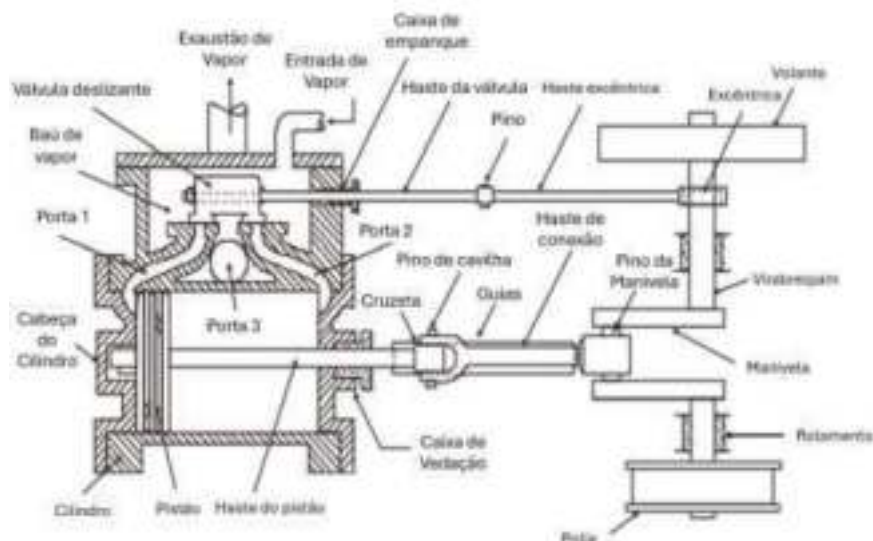
- I. **Compressão isotérmica 1-2:** Neste processo, os pistões de compressão e expansão se movem para cima, realizando compressão no fluido de trabalho, enquanto o calor é rejeitado (Q_c) para o sistema de resfriamento, mantendo a temperatura constante da fonte fria (T_c).

- II. **Aquecimento isocórico 2-3:** O pistão de compressão vai até o PMS, enquanto o pistão de expansão se movimento para baixo. O fluido de trabalho nesta etapa passa para o espaço de expansão, sendo aquecido pela fonte externa ($Q_{r,g}$) aumentando sua pressão.
- III. **Expansão isotérmica 3-4:** Ambos os pistões agora se movem para baixo, expandindo o fluido realizando trabalho. Nesta etapa, durante a expansão o gás recebe calor da fonte externa (Q_h), a temperatura constante da fonte quente (T_h)
- IV. **Resfriamento isocórico 4-1:** O pistão quente retorna até a posição superior enquanto simultaneamente o pistão frio desce, quando o gás passa novamente através do regenerador, cedendo calor ($Q_{r,g}$) que será utilizado novamente na segunda fase.

Neste tipo de motor, a energia térmica é convertida em movimento mecânico através da variação de pressão do gás, que movimenta um pistão ou outro dispositivo mecânico, conforme pode ser observado na Figura 3. Uma das principais vantagens do motor Stirling, conforme apontado por Organ (2014) é sua eficiência teórica elevada, mas sua implementação prática pode ser complexa.

Os motores a vapor são considerados, conforme Pacazza *et al* (2022), como equipamentos e/ou máquinas térmicas que operam utilizando a expansão do vapor d'água para gerar movimento mecânico. Na Figura 5 está ilustrado um modelo de máquina a vapor bem como seus componentes.

Figura 5—Motor a vapor e seus componentes.



Fonte: Adaptado de da Silva, 2019.

Nestes tipos de motores, segundo da Silva (2019), a água é aquecida para formar vapor, que é então dirigido para um cilindro, onde expande e realiza trabalho mecânico empurrando um pistão, conforme visualizado na Figura 5. Estes motores a vapor foram amplamente utilizados durante a Revolução Industrial, mas agora são menos comuns devido à prevalência de motores de combustão interna e outras tecnologias mais eficientes e atuais.

Embora esses motores de combustão externa tenham sido predominantes em determinadas épocas e aplicações, para os Lopes (2023) e Salomão *et al* (2018), os motores de combustão interna, como os motores a gasolina e diesel, tornaram-se mais comuns em veículos e equipamentos modernos devido à sua eficiência, tamanho compacto e maior potência específica, afirma os autores. No entanto, para da Silva (2019), os motores de combustão externa ainda são explorados em algumas aplicações específicas, como em usinas de energia solar concentrada, onde o calor do sol é usado para alimentar motores Stirling.

2.2 Motores de combustão interna (MCI)

Os motores de combustão interna (MCI) são máquinas térmicas, (Heywood, 2018), e mecânicas capazes de converter energia térmica proveniente de combustíveis em energia mecânica, sendo que essa energia pode ser utilizada para gerar movimento ou mesmo energia elétrica. Por sua vez, segundo Brunetti (2014), as máquinas térmicas são dispositivos que permitem transformar o calor (energia térmica) em trabalho útil.

De acordo com os autores mencionados no parágrafo anterior, as fontes de obtenção do calor (energia) podem ser, por exemplo: combustão, energia elétrica, energia atômica etc. Tal obtenção de trabalho é ocasionada por uma sequência de processos realizados em uma substância denominada FA (Fluido ativo) que neste caso é formado pela mistura de ar e combustível.

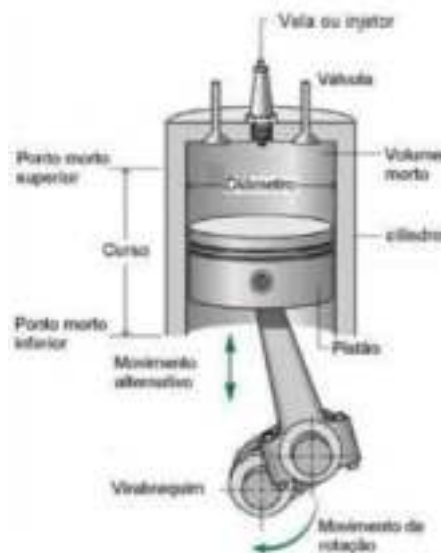
Desta forma, pode-se concluir que os motores de combustão interna são máquinas térmicas cujo FA participa diretamente da combustão convertendo a energia química dos combustíveis em energia mecânica (trabalho), com amplas oportunidades de análises e benefícios tecnológicos atuais que ainda podem ser explorados, afirma Heywood (2018)

Os motores de combustão interna por sua vez, segundo Brunetti (2014), podem ser classificados em três diferentes tipos quanto à forma de se obter trabalho mecânico:

I. Motores Alternativos: Nestes tipos de motores, segundo Heywood (2018), ou seja, motores de pistão convencional, o trabalho é obtido pelo movimento alternativo de um pistão ou mais, que por sua vez é movimentado pela ação da combustão da mistura de ar e combustível

no interior do cilindro, transformando em rotação contínua por um sistema de biela-manivela, conforme pode ser verificado esquematicamente na Figura 6.

Figura 6 - Esquema de um motor alternativo por ignição à centelha.



Fonte: Adaptado de da Costa, 2007.

Observa-se na figura os seguintes componentes:

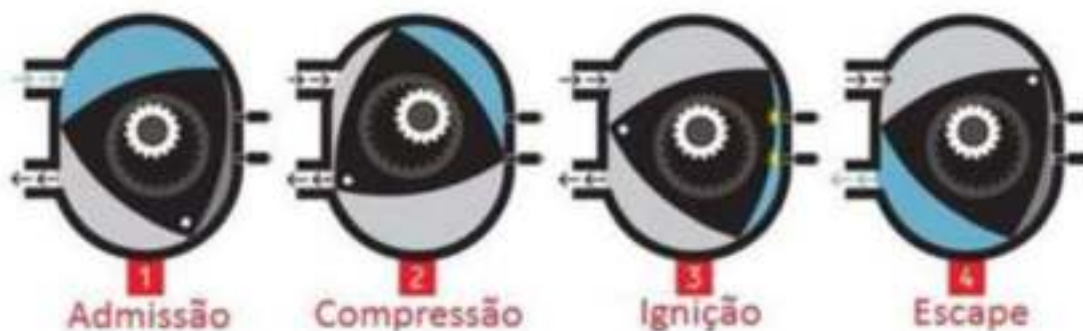
- **Ponto morto superior (PMS):** É posição na qual o pistão encontra-se mais próximo possível das válvulas e vela.
- **Ponto morto inferior (PMI):** É a posição na qual o pistão encontra-se mais afastado possível das válvulas e vela.
- **Curso:** É a distância percorrida entre o PMS ao PMI e vice-versa.
- **Virabrequim:** Peça crucial no motor de combustão interna. Ela é responsável por converter o movimento linear em movimento rotativo proporcionando a transmissão de energia gerada pela combustão para a transmissão do veículo e assim, possibilitando o movimento do mesmo.
- **Pistão:** Componente do MCI que se move para cima e para baixo repetitivamente dentro do cilindro atuando em conjunto na combustão com a mistura ar-combustível.
- **Cilindro:** Como o próprio nome diz, é uma câmara alongada cilíndrica onde ocorre o processo de combustão.
- **Volume morto:** Volume morto refere-se ao espaço dentro do cilindro que não contribui diretamente para a combustão ou a produção de trabalho. É o volume que fica disponível quando o pistão se encontra no PMS.

- **Válvula:** Os motores de combustão interna possuem duas válvulas, de admissão e escape. A válvula de admissão admite o ar e o combustível. A válvula de escape libera os gases produtos da combustão para a atmosfera.

- **Vela ou Injetor:** Para os motores de combustão interna regidos a ciclo Otto considera-se vela. É o dispositivo que provoca a centelha que inflama a mistura explodindo-a para a combustão.

II. Motores Rotativos: Os motores rotativos, segundo Avelino (2018), também conhecidos como motores Wankel, são motores de combustão interna que operam de maneira diferente dos motores de pistão convencionais. Eles foram inventados pelo engenheiro alemão Felix Wankel na década de 1950, e esquematicamente representado conforme a Figura 7.

Figura 7—Os quatro tempos do motor Wankel



Fonte: Cardoso *et al*, 2016

Os motores rotativos, conforme exposto por Avelino (2018), ao invés de pistões com movimentos alternativos no interior dos cilindros possuem um rotor triangular ou oval que gira dentro de uma câmara também oval. Este movimento rotativo do rotor é convertido diretamente em movimento rotativo no eixo de saída, eliminando a necessidade de componentes adicionais, como bielas e virabrequins, (CARDOSO *et al*, 2016).

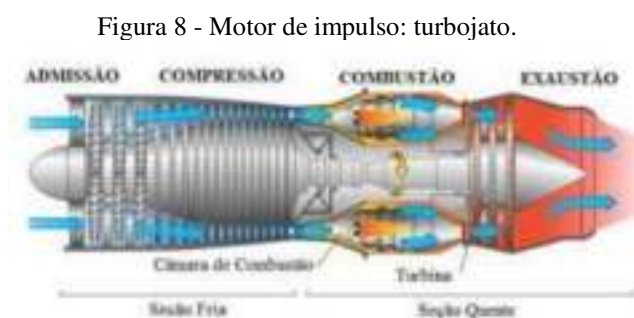
Estes motores rotativos, de acordo com Boukhari (2021), apesar de serem conhecidos por sua suavidade de operação e falta de vibração, já que não há movimento alternativo de pistões, apresentam uma alta relação potência-peso e um tamanho compacto, o que os torna atraentes para algumas aplicações.

Porém, ainda Boukhari (2021), alerta quanto aos desafios em relação à eficiência de combustão e consumo de combustível em comparação com motores de pistão, ou seja, o selamento entre as faces do rotor e a carcaça é crítico para o desempenho, e problemas de vedação podem levar a vazamentos de compressão e redução da eficiência.

III. Motores de impulso: Os motores de impulso, de acordo com Brunetti (2014), são dispositivos e ou máquinas térmicas projetadas para gerar movimento ou propulsão através da expulsão de massa a alta velocidade, de acordo com o princípio da conservação do momento.

O princípio da conservação do momento é uma lei fundamental da física que afirma que, em um sistema isolado, a quantidade total de momento, que é o produto da massa e da velocidade de um objeto, permanece constante ao longo do tempo, desde que nenhuma força externa atue sobre ele. Isso significa que, em um sistema isolado, a quantidade total de momento antes de uma interação é igual à quantidade total de momento após a interação, mesmo que haja transferência de momento entre os objetos no sistema. Em termos simples, isso implica que a quantidade de movimento total em um sistema fechado permanece constante, a menos que forças externas atuem sobre ele (Furtado, 2013).

Na Figura 8 pode ser visualizado de forma esquemática um exemplo de um motor de impulso.



Fonte: Ramos e das Dores (2017).

Para os autores Zimmer e Ocampo (2005), os motores de impulso são mais complexos, mas oferecem mais controle sobre o processo de combustão e permitem, por exemplo, amplos ajustes na trajetória da espaçonave. Os motores de impulso desempenham um papel crucial em exploração espacial, satélites, lançamentos de foguetes e até mesmo em algumas aplicações aeronáuticas (de Abreu, 2013). A escolha do tipo de motor de impulso, para os autores, depende das características específicas da missão, como a carga útil, o destino, a duração da missão e a eficiência desejada.

2.3 Classificações dos motores de combustão interna alternativos

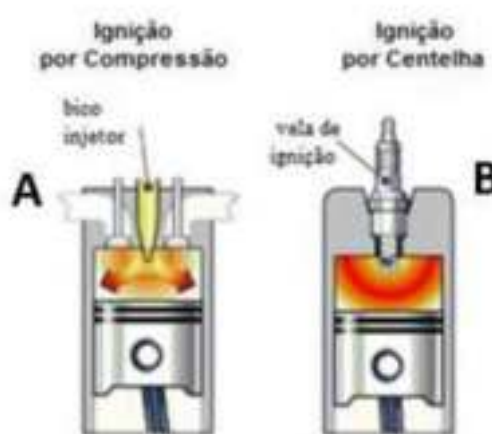
Os motores de combustão interna podem ser classificados de diversas maneiras de acordo com: método de ignição, quanto ao número de tempos do ciclo de operação, quanto ao sistema de alimentação de combustível, quanto à disposição dos órgãos internos, quanto ao sistema de arrefecimento, quanto às válvulas, quanto à alimentação de ar, quanto a relação entre o diâmetro

e curso do pistão, quanto à rotação e quanto à fase de combustível segundo os autores Heywood (2018) e Brunetti (2014).

2.3.1 Método de ignição

Denomina-se ignição o processo que provoca o início da combustão, que por sua vez, é um processo químico exotérmico de oxidação de um combustível. E para que ocorra a reação do combustível com o oxigênio do ar, é necessário um agente que provoque o início desta reação (Brunetti, 2014). Sendo assim, quanto ao método de ignição, os motores alternativos são divididos em dois tipos, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - (A) Motor de Ignição Espontânea (Diesel), (B) Motor de combustão por faísca ou centelha



Fonte: Adaptado de Negry (2015).

I. Motores de Ignição por Centelha (faísca) ou Otto: Nesses motores, a mistura de ar-combustível é previamente dosada ou formada no interior dos cilindros quando há injeção direta de combustível e admitida no interior do cilindro de combustão do motor e é inflamada por uma faísca gerada entre os eletrodos de uma vela de ignição apresentada na Figura 9 item (B) quando o pistão se encontra no PMS (Borin, 2023).

II. Motores de Ignição Espontânea ou Diesel: Ao contrário dos motores de ignição por faísca, nestes motores, não há presença de uma centelha para o início da combustão. Nestes motores, o pistão realiza a compressão somente do ar, até que ele atinja uma temperatura elevada suficiente o bastante para quando o pistão aproximar do ponto morto superior (PMS), o combustível (óleo diesel) seja inserido onde finalmente ocorre a reação espontânea com o oxigênio presente no ar quente (Camargo *et al*, 2013). Ou seja, o ar é comprimido

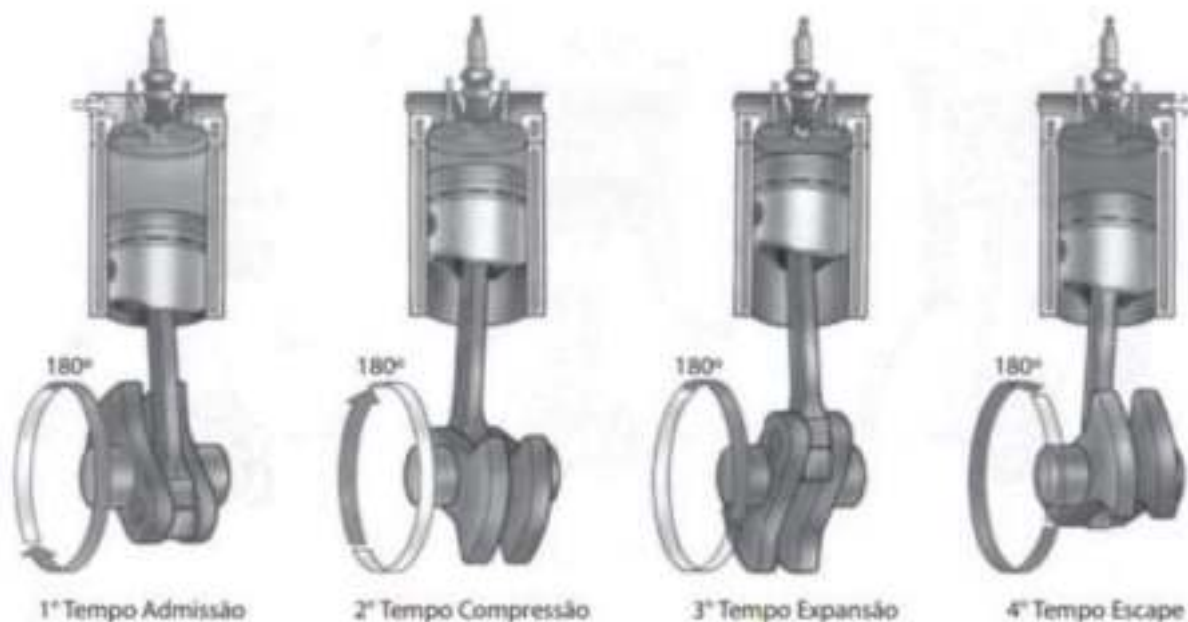
suficientemente até que se obtenha uma temperatura adequada para a combustão espontânea, temperatura essa chamada de "temperatura de autoignição (TAI)". Portanto, no lugar da vela, temos o bico injetor de combustível apresentado na Figura 9 item (A) (Silva *et al*, 2019).

2.3.2 Número de tempos do ciclo de operação

O ciclo de operação ou apenas ciclo, consiste na sequência de processos que a mistura de ar-combustível sofre, tais processos se repetem periodicamente para a obtenção do trabalho útil. O tempo é entendido pelo curso (movimento) do pistão, e não se deve confundir processo e tempo, pois dentro de um tempo do ciclo, ocorre diversos processos (Brunetti, 2014). Portanto, quanto ao número de tempos, os motores alternativos são divididos em dois grupos:

I. Motores alternativos a quatro tempos (4T): Neste tipo de motor, o pistão percorre 4 cursos para completar o ciclo completo, correspondendo duas voltas da manivela do motor conforme apresentado na Figura 10. Os quatro tempos são: Admissão, Compressão, Expansão e Escape que serão abordados de forma detalhada no próximo item deste trabalho (Mateazzo, 2022).

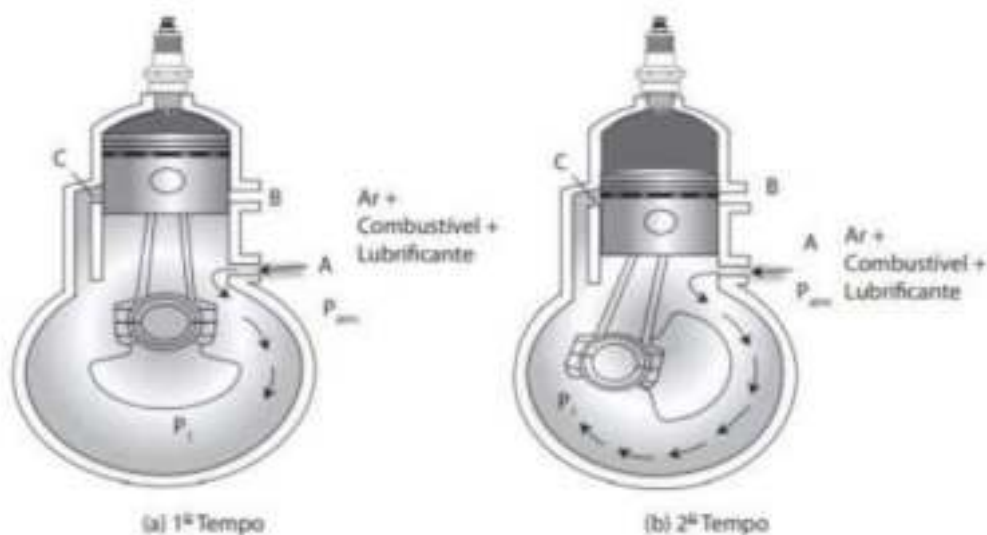
Figura 10 - Os Quatro tempos de um motor alternativo ciclo Otto.



Fonte: Brunetti, 2014.

II. Motores alternativos a dois tempos (2T): De forma similar ao caso anterior, neste caso o pistão completa o ciclo com apenas dois cursos e uma única volta no eixo do motor conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Os dois tempos de um motor alternativo ciclo Otto.



Fonte: Brunetti, 2014.

Este tipo de motor executa os mesmos tempos dos motores a 4T, entretanto, alguns deles se sobrepõem em um mesmo curso (Martins, 2020). O 1º tempo (a) apresentado na Figura 5 é o tempo de admissão, onde o pistão se move para baixo, criando um vácuo no cilindro permitindo que a mistura de ar-combustível adentre a câmara de combustão. No 2º tempo (b) ocorre a compressão e a combustão. Neste tempo o pistão comprime a mistura no PMS e a vela de ignição produz uma centelha resultando a combustão da mistura e empurrando o cilindro novamente ao PMI. A exaustão ocorre à medida em que o pistão se move para baixo no processo de admissão, o que é uma característica distinta dos motores de dois tempos (Heywood, 2018).

2.3.3 Alimentação de combustível

Os motores de combustão interna são alimentados por combustível. A alimentação pode ocorrer por meio de duas formas (Martins, 2020):

I. Carburador: O carburador é um elemento mecânico que realiza a mistura ar-combustível, dosando a quantidade de combustível para determinada vazão de ar admitida pelo motor. Este método possui uma válvula de ar ou borboleta que possui a função de aumentar ou diminuir a vazão da mistura ar-combustível de acordo com a

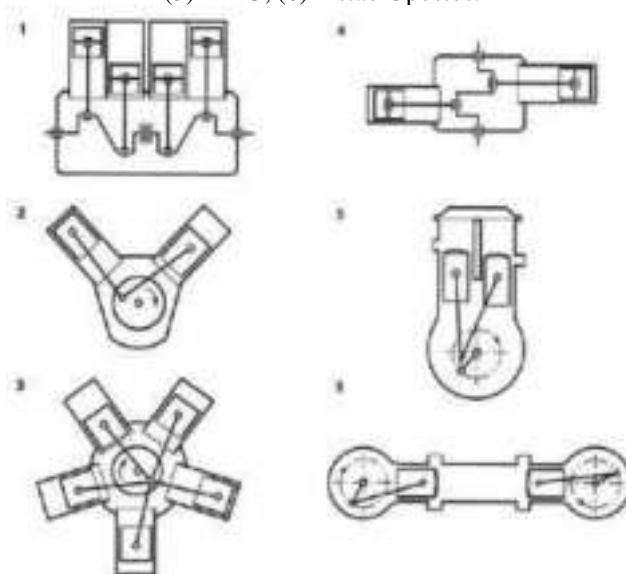
aceleração aplicada no veículo. Atualmente o carburador é utilizado em aplicações de baixa potência onde as limitações de poluentes são menos restritivas (De Sousa 2012).

II. Injeção Eletrônica: A injeção de combustível por meio da injeção eletrônica, ao contrário do carburador, é mais precisa e permite melhores resultados no controle de emissões. É formada por um sistema de alimentação diferenciado onde o combustível não é sugado pelo motor, mas sim, pulverizado através de eletroválvulas denominadas válvulas de injeção. O controle do sistema, ou o fornecimento de combustível, é ajustado através dos atuadores que recebem o comando da unidade central que por sua vez recebe informações de sensores a respeito das condições de funcionamento do sistema (Shiraishi, 2018).

2.3.4 Disposição dos cilindros

Essa classificação é condicionada a possível dimensão do conjunto. Trata-se do posicionamento dos pistões no motor. Abaixo na Figura 12 estão demonstradas as configurações mais comuns conhecidas (Brunetti, 2014).

Figura 12 - Configuração dos motores multicilindros: (1) Em linha, (2) Em V, (3) Radial, (4) Cilindros Opostos, (5) Em U, (6) Pistão Opostos.



Fonte: Heywood (2018).

Os motores em linha, item (1), presente na Figura 12, são um tipo comum de motor multicilíndrico em que os cilindros estão alinhados em uma única linha paralela ao eixo do

virabrequim. São amplamente utilizados em uma variedade de veículos e também em equipamentos industriais e algumas aplicações marítimas (Heywood, 2018; Martins, 2020).

Nos motores em V, item (2), na Figura 12, os cilindros são divididos em duas bancadas, geralmente dispostas em um ângulo que varia cerca de 60 a 90 graus proporcionando que o motor seja mais compacto se comparado ao motor em linha e possuem a mesma aplicação (Heywood, 2018; Martins, 2020).

Nos motores radiais ou estrela, item (3), ilustrado na Figura 12, os cilindros são dispostos em uma configuração circular ou semicircular, com suas extremidades conectadas a um eixo central. Esse tipo de motor está mais associado a aeronaves. No entanto, também foram utilizados em veículos terrestres, marítimos e em aplicações industriais no passado (Heywood, 2018; Martins, 2020).

Nos motores opostos, item (4) conhecidos também com *flat* ou *boxer*, apresentado na Figura 12, os cilindros são dispostos em uma configuração horizontal, com pistões de cada par se movendo em direções opostas. São utilizados em veículos terrestres, equipamentos de potência como geradores e principalmente aeronaves devido à sua suavidade de funcionamento, eficiência e baixo peso (Heywood, 2018; Martins, 2020).

Nos motores em U, item (5), ilustrado na Figura 12, os cilindros são dispostos em duas fileiras paralelas, uma ao lado da outra e conectados a um eixo central. Podem ser encontrados em veículos *off-road*, militares e em certas aplicações industriais (Heywood, 2018; Martins, 2020).

Por fim, nos motores de pistão opostos, item (6), presente na Figura 12, os pistões estão alojados no interior de um cilindro, transmitindo a força a dois virabrequins situados nas extremidades. É encontrado frequentemente em motores de dois tempos a diesel (Heywood, 2018; Martins, 2020).

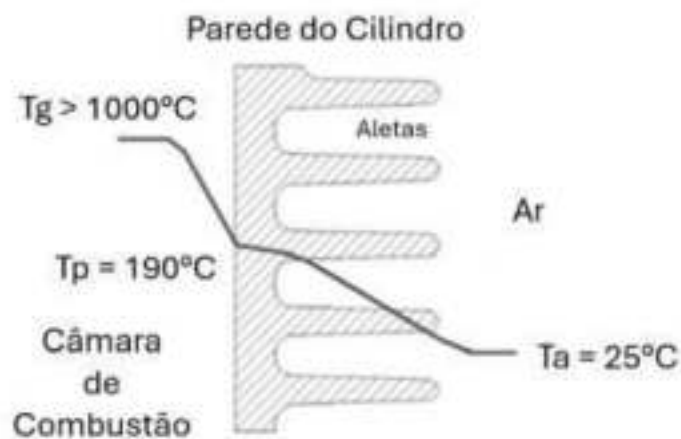
2.3.5 Sistema de arrefecimento

O movimento executado pelos pistões e o trabalho gerado pela combustão resultam em uma parcela significativa de atrito e calor. Desta forma, é necessário um sistema de arrefecimento eficiente para garantir a manutenção da vida dos componentes. O arrefecimento pode ser realizado de duas formas, a ar (geralmente em motores pequenos, utilizando aletas conforme ilustrado na Figura 13 ou a água conforme ilustrado na Figura 14) (de Faria, 2022).

- I. **Arrefecimento a ar:** Nestes motores, o calor gerado durante a combustão (T_g) é dispersado diretamente pelo ar circundante através de aletas de refrigeração localizadas

na parte externa do motor conforme ilustrado na Figura 13. E este ar é então expelido através de aberturas no motor ou por ventiladores. (Machado, 2015)

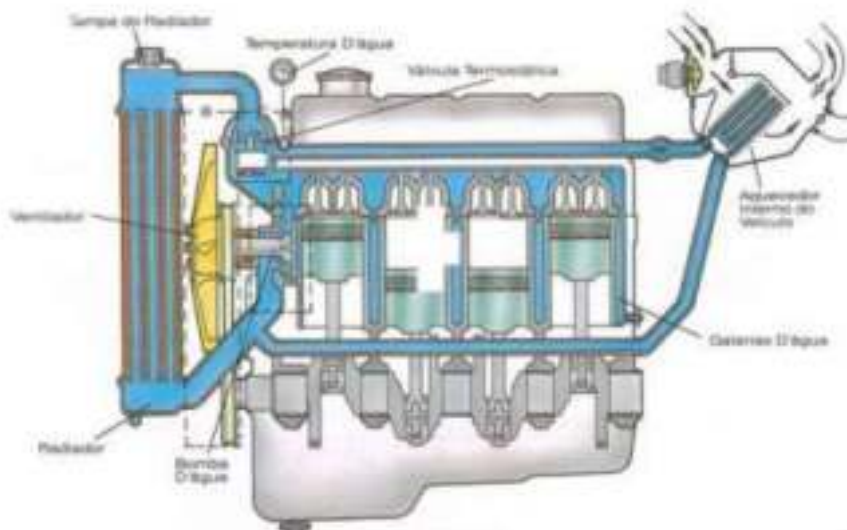
Figura 13 - Representação das aletas de um motor arrefecido a ar



Fonte: Adaptado de Ferazza (2022).

- II. Arrefecimento a água:** Este tipo de motor de combustão interna utiliza água como meio de dissipação de calor. Nesse sistema, conforme ilustrado na Figura 14, a água é bombeada para um radiador, onde é arrefecida pelo ar que passa através dele (de Faria, 2022).

Figura 14 - Esquema de um motor arrefecido a água

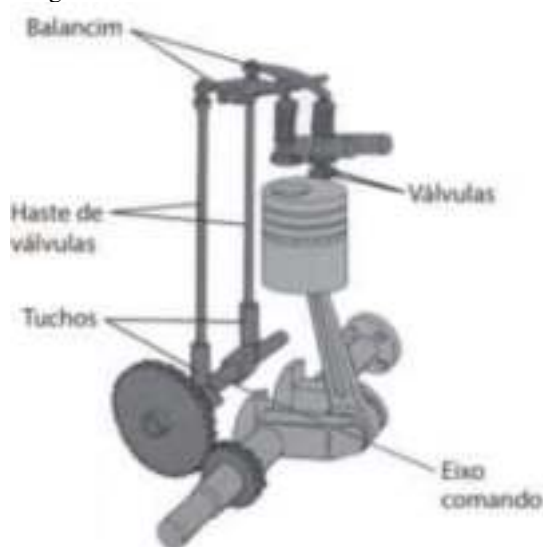


Fonte: Gonçalves (2014).

2.3.6 Válvulas de admissão e exaustão

O eixo de comando de válvulas composto por: tucho, balancins e hastes, ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Sistema de acionamento de válvulas.



Fonte: Brunetti (2014).

Este é o mecanismo responsável pela abertura e fechamento das válvulas durante a operação do motor. Portanto, pode-se classificar o motor quanto a posição deste comando de válvulas e também pela quantidade de válvulas de admissão presentes no motor a depender da disposição dos órgãos internos conforme apresentado na Figura 12 (Martins, 2020).

2.3.7 Alimentação de ar

A quantidade de ar que é admitida e retida no interior do cilindro está fortemente ligada ao desempenho de um motor de combustão interna, pois, quanto mais ar é admitido, maior será a quantidade de combustível adicionada e oxidada posteriormente. Sendo assim, podemos classificar os motores de combustão interna em dois grupos com relação à alimentação de ar, segundo Brunetti (2014) e Heywood (2018):

- I. **Naturalmente aspirado:** Neste tipo de motor, a admissão do ar se dá em função da geração de um gradiente de pressão entre o cilindro e o coletor de admissão. Esse

gradiente ocorre devido ao deslocamento do pistão do PMS para o PMI, gerando uma depressão e assim, aspirando ar de forma natural para o interior do cilindro, ou seja, para estes os motores o processo de admissão é limitado pela pressão de admissão, neste caso, a pressão atmosférica (Nogueira, 2021).

- II. Sobrealimentados:** Estes motores foram desenvolvidos com a intenção de aumentar o gradiente e a massa de ar admitida pelo motor. Nestes motores, existem dispositivos localizados no coletor de admissão que elevam a pressão acima da pressão atmosférica. Pode-se citar como exemplo o turbocompressor que utiliza gases do escapamento para gerar trabalho em uma turbina que transfere para o compressor, que aumenta a pressão no coletor. Existe uma forma mecânica a qual o compressor é acionado pelo motor e comprime o ar no coletor e no interior da câmara durante a admissão. Estes processos geram aumento da temperatura e conseqüentemente redução da massa específica do ar. Para minimizar este efeito, foram concebidos resfriadores que reduzem a temperatura após a saída do compressor (Paula, 2023).

2.3.8 Diâmetro e curso do pistão

Com relação ao diâmetro e curso do pistão, segundo Heywood (2018), pode-se classificar os MCI de três formas, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16–Representação esquemática da classificação segundo ao diâmetro x curso



Fonte: Próprio autor (2024).

- I. **Motor superquadrado:** Apresentado como item (A) na Figura 16, o diâmetro é maior que o curso. Caracteriza-se neste caso, motores de veículos esportivos com torque e potência em altas rotações (Brunetti, 2014; Martins, 2020).
- II. **Motor quadrado:** Apresentado na Figura 16, item (B), o diâmetro do pistão é igual ao do curso, ou seja, a relação entre o diâmetro do cilindro e o comprimento do curso, é próxima de 1:1. Esses motores tendem a ter uma resposta mais rápida ao acelerador, mas podem ser menos eficientes em termos de consumo de combustível em certas situações. São comuns em aplicações onde a resposta rápida é essencial, como motocicletas esportivas e veículos de alto desempenho. (Brunetti, 2014; Martins, 2020)
- III. **Motor subquadrado:** Item (C), na Figura 16, é aquele em que o curso do pistão, é maior que o diâmetro do cilindro, resultando em uma relação entre o diâmetro e o curso menor do que 1:1. Isso implica em dizer que o pistão percorre uma distância maior em cada ciclo de combustão. Esses motores produzem mais torque em baixas rotações, o que é útil para veículos que precisam de força em velocidades mais baixas, como carros de passeio. Entretanto, possuem uma resposta menos ágil ao acelerar. (Brunetti, 2014; Martins, 2020)

2.3.9 Rotação do Virabrequim

Com relação à rotação, segundo Martins (2020), os motores de combustão interna são classificados em:

- I. **Rápidos:** Os motores de alta rotação são projetados para atingir altas rotações por minuto (RPM) de forma eficiente. São comuns em aplicações de alto desempenho, como carros esportivos e motocicletas de corrida. Em síntese possuem uma resposta rápida ao acelerador e uma entrega de potência linear em altas velocidades. Possuem rotação superiores a 1500 (rpm) ($n > 1500$) (de Albuquerque, 2015).
- II. **Médios:** Esses motores são projetados para operar em uma faixa intermediária de rotações por minuto (RPM), oferecendo equilíbrio entre torque e potência em uma variedade de situações de condução. São comumente aplicados em veículos de uso diário, combinando desempenho e eficiência. Possuem uma rotação entre 600 a 1500 RPM ($600 < n < 1500$) (Brunetti, 2014).

III. Lentos: Os motores de rotação lenta são projetados para operar em velocidades mais baixas, oferecendo alto torque em baixas rotações por minuto (RPM). São comumente aplicados em situações em que requerem força e potência em baixas velocidades, como veículos industriais, máquinas agrícolas e embarcações de grande porte (Meyer *et al*, 2015). Possuem uma rotação abaixo de 600 RPM ($n < 600$) (Brunetti, 2014).

2.3.10 Estado físico do combustível

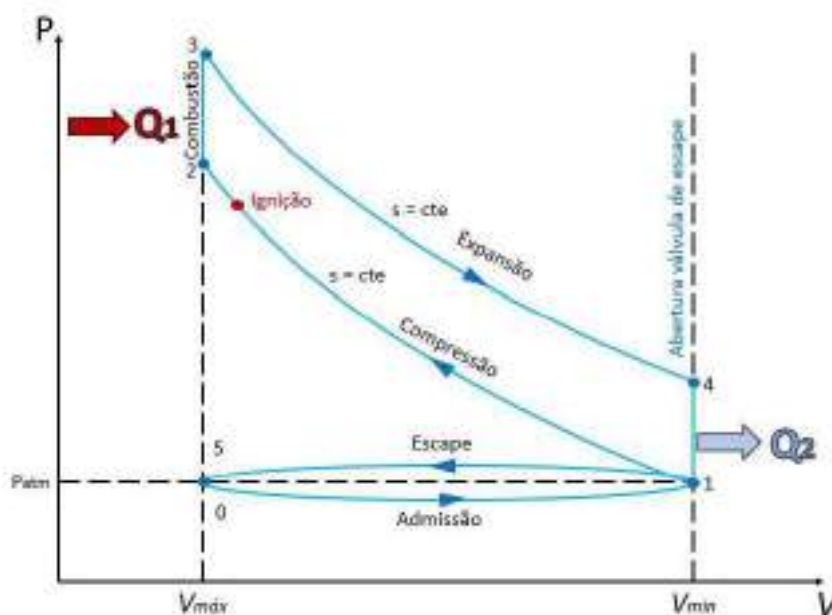
Essa classificação divide-se entre os motores que utilizam combustíveis gasosos e motores que utilizam combustíveis líquidos (Heywood, 2018). A principal diferença, em suma, está nos requisitos de manuseio que vão desde o abastecimento, armazenamento e injeção do combustível, bem como nas características de energia e eficiência. Os combustíveis líquidos possuem uma densidade de energia relativamente alta, o que significa que uma quantidade de energia significativa pode ser armazenada em uma pequena quantidade de combustível. Por outro lado, os combustíveis gasosos possuem uma densidade de energia mais baixa, o que significa que uma maior quantidade de combustível é necessária para produzir a mesma quantidade de energia dos combustíveis líquidos (De Carvalho, 2011; Rocha *et al*, 2022).

2.4 Ciclo Otto

O ciclo de Ar-Padrão Otto é um ciclo ideal termodinâmico que considera que a adição de calor é realizada de maneira instantânea enquanto o pistão do motor encontra-se no ponto morto superior (PMS) do cilindro (Moran *et al*, 2013). Tal ciclo é utilizado em motores de combustão interna e foi desenvolvido por Nikolaus August Otto em 1867. O ciclo completo contempla quatro tempos internamente reversíveis em série, são eles: admissão, compressão, explosão e exaustão. Tais estágios são vitais na produção de energia em forma de calor que por sua vez é transformada em trabalho através dos mecanismos presentes no motor (Moreira *et al.*, 2019).

Para auxílio na visualização dos 6 processos termodinâmicos que ocorrem no motor durante o Ciclo Otto quatro tempos, encontra-se abaixo a Figura 17. Cada tempo do motor corresponde a meia volta no virabrequim (180°) conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Ciclo Otto teórico.



Fonte: Próprio autor (2024).

Baseado na Figura 17, pode-se observar o seguinte:

- I. **Tempo de Admissão (180°) 0-1:** O tempo de admissão do ciclo Otto se inicia no ponto 0 representado na Figura 16. Neste momento o pistão encontra-se no volume mínimo (V_{\min}), também conhecido como volume morto, que nada mais é quando o pistão se encontra na máxima altura de seu curso, conhecido como Ponto Morto Superior (PMS) ou TDC (*Top-Dead-Center*) do inglês conforme a Figura 06.

Neste momento ambas as válvulas (admissão e exaustão) se encontram fechadas. Ao pistão iniciar o movimento descendente, o mesmo de forma representativa se direciona até o ponto 1 onde atinge seu ponto de volume máximo (V_{\max}) conhecido como PMI (Ponto Morto Inferior) ou BDC (*Bottom-Dead-Center*). Sincronizado ao pistão a válvula de admissão é aberta e tem-se o início do processo de aspiração da mistura de ar-combustível no interior da câmara de combustão. Este processo é isobárico, ou seja, ocorre à pressão contante abaixo da pressão atmosférica. (Mateazzo, 2022; Moran *et al*, 2013)

- II. **Tempo de Compressão (360°) 1-2:** Neste momento o pistão inicia um movimento ascendente em direção ao PMS realizando uma compressão isentrópica da mistura, ou seja, sem troca de calor com o ambiente externo. (Mateazzo, 2022; Moran *et al*, 2013)

III. Tempo de Combustão (540°) 2-3 e 3-4: O tempo de combustão se inicia com a centelha da vela de ignição que faz com que a mistura se inflame fazendo com que ocorra uma troca de calor isocórica, em outras palavras, a volume constante, com a fonte externa.

Em seguida, no intervalo 3-4 tem-se o curso de potência do ciclo Otto. Com a explosão, logo após a centelha, a mistura adquire grande quantidade de energia gerada através do calor, representada por Q_1 . O pistão então é empurrado até o PMI realizando uma expansão isentrópica convertendo a parte da energia térmica Q_1 em energia mecânica W_{cicl} através de trabalho.

Por esta razão o curso é denominado também como curso de potência conforme citado anteriormente. É importante salientar que os valores de temperatura e pressão diminuem de acordo com o aumento de volume no interior do cilindro. (Mateazzo, 2022; Moran *et al*, 2013)

IV. Tempo de Exaustão (720°) 4-5 ou 1-5: É o processo que completa o ciclo. Em volume constante (processo isocórico) o calor é rejeitado pelo ar (transferida para a fonte fria do motor representada pela variável Q_2) conforme o pistão está no PMI. Entretanto, para que o motor inicie novamente o seu ciclo térmico, é necessário que todas as substâncias oriundas da combustão sejam expelidas do interior da câmara.

Desta forma, o pistão inicia um movimento ascendente até o PMS e sincronizado a ele a válvula de escape é aberta para que os produtos da combustão sejam liberados para a atmosfera de forma isobárica. Neste momento o virabrequim terá realizado 2 revoluções completas, caracterizando assim, um ciclo completo. (Mateazzo, 2022; Moran *et al*, 2013)

2.5 Parâmetros de avaliação de um motor de combustão interna

Nesta etapa, serão abordados os parâmetros de avaliação de um motor de combustão interna que subsidiou a análise técnica comparativa entre os combustíveis estudados.

2.5.1 Relação ar-combustível

Este parâmetro possui grande importância no controle do MCI pois esta relação garante que a combustão seja estequiométrica. Ou seja, garante que toda massa de combustível que entra no cilindro, ou especificadamente todos os hidrocarbonetos, após a combustão, foram convertidos, juntamente com a massa de oxigênio (ar) em água (H_2O) e dióxido de carbono (CO_2), ou seja, conservação de massas (Pereira, 2015).

A relação ar-combustível em base molar estequiométrica (\overline{RM}_e) pode ser obtida por meio da Equação 01. Para realizar a conversão para base mássica estequiométrica (RM_e), utiliza-se a Equação 02 conforme Franco e Mendes (2021).

$$\overline{RM}_e = \frac{\text{número de mols de ar}}{\text{número de mols de combustível}} \quad (01)$$

$$RM_e = \overline{RM}_e \cdot \frac{\text{massa molar do ar}}{\text{massa molar do combustível}} \quad (02)$$

Em posse da razão estequiométrica do combustível utilizado, é possível definir o valor da relação ar-combustível em base mássica RM , conforme a Equação 03 segundo Pereira (2015):

$$RM = \lambda \cdot RM_e \quad (03)$$

Sendo λ coeficiente de excesso de ar. Ainda segundo Pereira (2015) e juntamente com Ribbens (1998), esta relação é importante porque afeta diretamente a eficiência da combustão, bem como a quantidade de poluentes emitidos durante o processo. A relação ar-combustível em base mássica estequiométrica (RM_e) representa a proporção ideal para a combustão completa, enquanto relação ar-combustível em base mássica (RM), pode variar dependendo das condições e requisitos específicos do motor e da operação.

Quanto menor o valor da relação ar-combustível em base mássica RM , maior é o consumo de combustível, ou seja, maior é a vazão mássica de combustível necessária para a operação do motor, afirmam Franco e Mendes (2021).

2.5.2 Vazão mássica de combustível e ar

A vazão mássica (\dot{m}) determina a quantidade de matéria que entra ou sai de um volume de controle em determinado tempo (Moran *et al*, 2013). Tais vazões mássicas precisam ser cuidadosamente controladas e otimizadas para garantir a eficiência energética, o desempenho ideal e a minimização das emissões de poluentes diz Martins (2020). Pode-se obter desta forma, segunda Franco e Mendes (2021), a vazão mássica do combustível (\dot{m}_{comb}) conforme a Equação 04 e a vazão mássica do ar (\dot{m}_{ar}) conforme a Equação 05. Para o gás de síntese, devido

a sua particularidade, o cálculo da vazão mássica de combustível (\dot{m}_{syngas}) é calculada por meio da Equação 06 (Franco e Mendes, 2021).

$$\dot{m}_{\text{comb}} = \frac{\dot{W}_{\text{term}}}{PCI} \quad (04)$$

$$\dot{m}_{\text{ar}} = \dot{m}_{\text{comb}} \cdot RM \quad (05)$$

$$\dot{m}_{\text{syngas}} = \frac{\dot{m}_{\text{ar}}}{RM} \quad (06)$$

Sendo \dot{W}_{term} a potência térmica, RM a relação ar-combustível em base mássica, PCI o poder calorífico inferior do combustível, \dot{m}_{ar} a vazão mássica de ar, \dot{m}_{syngas} a vazão mássica de gás de síntese e \dot{m}_{comb} a vazão mássica de combustível (gasolina e GNV).

2.5.3 Potência Efetiva

A potência efetiva (\dot{W}_{efet}) em motores de combustão interna é uma medida crucial que descreve a capacidade do motor de converter energia química do combustível em energia mecânica utilizável (Nabbout, 2017).

Os valores de potência efetiva, em geral, são fornecidos pelo fabricante pelo motor. Dessa forma, os valores para a gasolina e GNV são fornecidos. Entretanto, como o gás de síntese é um combustível alternativo faz-se necessário calcular este parâmetro. Para isso, segundo Franco e Mendes (2021), a potência efetiva para o motor operando com gás de síntese pode ser calculado conforme a Equação 07. Neste cálculo utiliza-se o Rendimento térmico efetivo (η_{tef}) e a potência térmica (\dot{W}_{term}). O rendimento térmico efetivo, segundo Heywood (2018), é uma medida percentual da eficiência com que o motor converte energia térmica contida no combustível em trabalho mecânico útil. A potência térmica será tratada no próximo item.

$$\dot{W}_{\text{efet}} = \eta_{\text{tef}} \cdot \dot{W}_{\text{term}} \quad (07)$$

Sendo \dot{W}_{term} potência térmica do motor e η_{tef} Rendimento térmico efetivo.

2.5.4 Potência Térmica

A potência térmica (\dot{W}_{term}) é o calor fornecido por unidade de tempo pela queima do combustível durante a combustão, ou seja, é a energia por unidade de massa de combustível (Brunetti, 2014). A potência térmica do motor, segundo Martins (2020), refere-se à capacidade do motor de converter calor em trabalho mecânico. Em síntese, quanto maior o valor, mais eficiente é o motor na conversão de energia térmica em mecânica (Varella, 2010).

Pode-se calcular este parâmetro conforme a Equação 08 para a gasolina e o GNV (Franco e Mendes, 2021). Ainda conforme os autores, para o gás de síntese, utiliza-se a Equação 09. Nesta por sua vez, é necessário obter o valor da vazão mássica do *syngas* e o PCI.

Estes valores percentuais referem-se à proporção da energia liberada pelo combustível durante o ciclo de combustão que é convertida em trabalho mecânico útil (Nabbout, 2017).

$$\dot{W}_{term} = \frac{W_{efet}}{\eta_{tef}} \quad (08)$$

$$\dot{W}_{term} = \dot{m}_{syngas} \cdot PCI \quad (09)$$

Sendo W_{efet} a potência efetiva do motor, η_{tef} rendimento térmico efetivo, \dot{m}_{syngas} vazão mássica do gás de síntese e PCI o poder calorífico inferior do gás de síntese.

2.5.5 Potência indicada

A potência indicada (\dot{W}_{ind}) é a potência teórica calculada da pressão efetiva média e de outros fatores produzida na cabeça dos pistões os quais afetam a potência de saída do motor, é desenvolvida na câmara de combustão sem referência a perdas por atrito no interior do motor Brunetti (2014). Ela é calculada com base no volume do cilindro, pressão e temperatura dos gases durante o ciclo de combustão. Essa potência representa a energia produzida pelo motor antes de considerar as perdas devido a atrito e outros fatores conforme citado acima (da Silva, 2006).

Para calcular este parâmetro utiliza-se a Equação 10 (Franco e Mendes, 2021; Martins, 2020). O rendimento indicado (η_{ind}) utilizado neste cálculo refere-se à um valor percentual da

eficiência teórica do motor na conversão de energia química do combustível em trabalho mecânico sem considerar perdas por atrito, calor ou outras formas de dissipação de energia (Nabbout, 2017).

$$W_{ind} = W_{efet} \cdot \eta_{ind} \quad (10)$$

Sendo W_{efet} potência efetiva do motor e η_{ind} o rendimento indicado.

2.5.6 Rendimento mecânico

O rendimento mecânico (η_{mec}) é o percentual de energia mecânica nos pistões que é convertido em energia mecânica no volante motor que segundo Varella (2010), é a proporção da potência mecânica efetiva produzida pelo motor em relação a potência indicada teoricamente disponível. Esse rendimento reflete a eficiência com que o motor converte a energia dos combustíveis em trabalho útil, levando em consideração perdas por atrito, calor e outros fatores (Nabbout, 2017). Sendo assim, segundo os autores Tristão e Sumioshi (2020), rendimento mecânico alto indica um motor mais eficiente na geração de potência útil para realizar trabalho mecânico.

Este parâmetro pode ser calculado utilizando a Equação 11 (Franco e Mendes, 2021; Martins, 2020).

$$\eta_{mec} = \frac{W_{efet}}{W_{ind}} \quad (11)$$

Sendo W_{efet} potência efetiva do motor e W_{ind} Potência indicada do motor.

2.6 Combustíveis

Combustíveis, segundo Moran *et al* (2013), é simplesmente uma substância inflamável. Em complemento, segundo da Silva *et al* (2022), substância química essa que possui a função de emitir calor através de uma reação exotérmica, possibilitando a geração de uma quantidade alta de energia.

Os motores de combustão interna, objeto principal deste estudo, utilizam em sua operação combustíveis que contêm hidrocarbonetos, ou seja, compostos de carbono (C) e hidrogênio (H). Além desses elementos, podem conter também oxigênio (O), nitrogênio (N), água (H₂O) e

cinzas (Rocha *et al*, 2022). Tais combustíveis podem ser classificados segundo da Silva *et al* (2022), como renováveis (origem vegetal) e não renováveis (origem fóssil).

Os combustíveis fósseis representam um grande grupo de combustíveis não renováveis que foram constituídos há milhares de anos por meio de restos de animais e vegetais. São exemplos: petróleo, gás natural, xisto, betuminoso e carvões minerais (e seus derivados: GLP, gasolina, óleo diesel, óleo combustível, óleos residuais e gases manufacturados) (Bizerra *et al*, 2018).

De forma análoga, as matérias primas advindas de origem vegetal e animal são caracterizadas de fontes renováveis e são os chamados biocombustíveis. Pode-se citar como exemplo: cana de açúcar, lenha e resíduos vegetais (e seus derivados: bagaço de cana, álcool etílico, carvão vegetal, gases manufacturados, biogás e metanol) (Carvalho *et al*, 2014).

Além da classificação conforme a fonte de obtenção do combustível supracitada, existe uma outra divisão de acordo com a fase e o modo de obtenção destes combustíveis, são elas: sólidos, líquidos e gasosos conforme a Figura 17 (Franco e Mendes, 2021).

Figura 18 - Classificação de Combustíveis Segundo a Fase e Modo de Obtenção.



Fonte: Silva et al (2022).

Os combustíveis sólidos são basicamente o carvão, lenha e resíduos vegetais. A composição química desses combustíveis é apresentada em termos de fração mássica e pela quantidade relativa de cada elemento químico existente nos mesmos (Santos, 2018).

Tais combustíveis são comumente utilizados para geração de energia nos meios de transporte e nas indústrias como agropecuária, siderúrgica, alimentícia e espacial. Possuem muitos pontos positivos, como: alta confiabilidade e rendimento, são mais baratos por não incluir petróleo e em sua grande maioria são renováveis (matéria prima a base de massa orgânica). Entretanto, ainda sim, existe alguns pontos negativos: resíduos pós combustão e emissão de cinzas no ar (Da Silva *et al*, 2022).

Os combustíveis líquidos são basicamente os derivados do petróleo. Exceto o Etanol que é de origem vegetal. A composição destes combustíveis também é apresentada em termos de fração mássica. (Franco e Mendes, 2021). Estes combustíveis são matérias compostas por vários tipos de hidrocarbonetos (substâncias que são compostas por átomos de hidrogênio e carbono) de ligação simples (saturadas) ou ligação dupla (insaturadas). Tais características são essenciais para determinar a forma e o acontecimento da combustão (Da Silva *et al*, 2022).

Dentre os três tipos os combustíveis, os líquidos são os mais comuns e amplamente utilizado pela sociedade pois possuem poucos malefícios, sendo os principais: não renovável, risco maior de vazamento devido sua forma líquida propiciando maior risco de incêndio. Seus benefícios são: não deixam resíduos após a queima, liberam menos gases poluentes em comparação com os combustíveis sólidos e sua utilização em motores de combustão interna é mais fácil e barata (Carvalho *et al*, 2014).

Os combustíveis gasosos podem ser naturais e artificiais. Os naturais são facilmente encontrados no interior da Terra em diversas regiões do mundo, pode-se citar com exemplos: gases naturais, como o metano. E quando não encontrados, podem ser manufaturados (artificiais) por meio de processos petroquímicos ou a partir do tratamento do carvão tendo como principal composto o metano. São exemplos: hidrogênio, GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), Biogás etc. (Franco e Mendes, 2021).

Combustíveis gasosos são uma fonte alternativa de energia limpa e potente pois possuem maior valor calorífico (ao ser queimado libera maior quantidade de energia) quando comparado aos demais combustíveis (líquidos e sólidos) segundo Da Silva *et al*, 2022.

2.7 Combustão

A combustão é uma reação química de oxidação rápida que gera calor e luz. Em outras palavras a combustão converte a energia armazenada em ligações químicas em energia térmica

(Turns, 2013). Tal reação só é possível que ocorra na presença dos seguintes reagentes: combustível, comburente (parcela que reage com o combustível) e fonte de calor. Desta forma, gera-se uma reação em cadeia (Moran *et al*, 2013).

A eficiência e a natureza da combustão dependem diretamente de vários fatores, incluindo a proporção correta entre combustíveis e oxidante, a temperatura e pressão do sistema, a presença de catalisadores e a qualidade da mistura de ar-combustível. O controle preciso desses parâmetros é essencial para otimizar a combustão, garantir a eficiência do motor e minimizar as emissões de poluentes (Turns, 2013).

2.8 Poder Calorífico

Poder calorífico é um parâmetro que representa a quantidade de energia térmica liberada durante a queima de uma determinada massa de combustível. Portanto, quanto maior o valor do PC, maior quantidade de energia esse combustível possui. Para este fator, existem duas classificações, poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (DAL BEM, 2008).

O poder calorífico superior (PCS) também conhecido como poder calorífico de combustão, é a quantidade total de calor liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa de combustível, quando a água resultante da combustão é condensada e a energia liberada na forma de vapor é recuperada. Em outras palavras, segundo Nogueira e Rendeiro (2018), o PCS inclui a energia liberada na forma de vapor d'água resultante da combustão do hidrogênio no combustível. Geralmente é utilizado em aplicações industriais e de engenharia.

Em contrapartida, o poder calorífico inferior (PCI) Também conhecido como poder calorífico líquido, é a quantidade total de calor liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa de combustível, desconsiderando a energia contida no vapor d'água produzido pela combustão (Moran *et al*, 2013). O PCI é frequentemente utilizado em aplicações relacionadas a motores de combustão interna e em processos de combustão direta (Habitzreiter *et al*, 2019).

Na Tabela 01 podem ser consultados os poderes caloríficos inferiores (PCI) e superiores (PCS) de alguns combustíveis.

Tabela 1 - Poderes caloríficos de combustíveis derivados do petróleo.

Combustível	PCI [MJ/Nm^3]	PCS [MJ/Nm^3]
Gasolina	43,448	46,536
Gás Natural	47,141	52,225
GLP	46,607	50,152
Butano	45,277	49,210
Propano	46,296	50,235

Fonte: Adaptado de Santos (2018).

2.9 Gasolina comum

A gasolina é um combustível líquido de mistura complexa que contém centenas de compostos químicos diferentes em sua composição. Portanto, dependendo do tipo de petróleo originário e das condições de refino, sua fórmula química varia, apresentando uma composição extremamente variável (De Carvalho, 2011). Basicamente a gasolina é o combustível não renovável mais conhecido atualmente, é obtida através da destilação do petróleo misturado com mais de 40 tipos de hidrocarbonetos (Da Silva et al, 2022).

Atualmente as gasolinas comercializadas no Brasil possuem uma composição considerada de 73% de gasolina pura (tipo A) e 27% de etanol anidro desde 16/03/2015 (Petrobras, 2023). Então, a gasolina resultante desta mistura é caracterizada como gasolina tipo C, ou, popularmente conhecida como gasolina comum (De Carvalho, 2011).

A gasolina é conhecida por sua alta densidade energética, o que significa que contém uma grande quantidade de energia em relação à sua massa. Isso a torna um combustível eficiente para motores de combustão interna, proporcionando uma boa relação potência-peso para veículos (Amaral e Ferreira, 2024).

Entretanto, apesar de ser amplamente utilizada, a gasolina apresenta desafios ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos. Por esta razão, pesquisas estão em andamento para desenvolver combustíveis alternativos mais sustentáveis e para melhorar a eficiência dos motores de combustão interna para que seja reduzido seu impacto ambiental. (Martins, 2020).

2.10 Gás Natural Veicular (GNV)

O gás natural veicular (GNV) é um combustível fóssil encontrado na natureza e segundo Junior e Souza (2012), é considerado uma fonte de energia mais limpa em comparação com

combustíveis líquidos tradicionais devido a sua menor emissão de poluentes durante a combustão.

Enquanto o petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos líquidos, o gás natural é composto principalmente por hidrocarbonetos gasosos. Sua composição é obtida através de uma mistura de diversos gases, destacando-se o gás metano que apresenta uma concentração de 89% a 99%. Outros hidrocarbonetos de maiores graus de concentração seriam o etano, propano e butano. Em baixas quantidades é possível encontrar alguns gases inertes como o hidrogênio, nitrogênio e dióxido de carbono (de Oliveira, 2018).

As vantagens associadas ao uso do GNV são: a redução de emissões, economia, desempenho do motor, disponibilidade e segurança. O gás natural produz menos dióxido (CO₂) de carbono, óxidos de Nitrogênio (NO_x) e material particulado em comparação aos combustíveis líquidos, o custo costuma ser mais baixo do que o da gasolina ou o diesel, o GNV pode melhorar o desempenho do motor devido a sua alta octanagem resultando em uma combustão mais eficiente e potência ligeiramente maior, existe em abundância em diversas regiões e é mais leve que o ar se dissipando rapidamente em caso de vazamento, sendo assim, mais seguro (Júnior e Souza, 2012).

Por outro lado, as desvantagens associadas à sua utilização são: infraestrutura limitada, custo inicial, menor autonomia e perda de espaço de carga. Apesar de ser abundante, nem todas as regiões possuem uma infraestrutura de distribuição de GNV bem desenvolvida, limitando seu acesso, a conversão de um veículo para operar com GNV pode ser cara e ainda reduz o espaço disponível para a bagagem ou carga por conta do cilindro e em comparação com os veículos movidos a gasolina ou diesel, os veículos a GNV geralmente têm uma autonomia menor devido à capacidade limitada dos tanques de gás (da Silva [2], 2021).

2.11 Gás de Síntese

O gás de síntese é um combustível gasoso de baixo PCI (Poder Calorífico Inferior) consistindo numa mistura de hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono em proporções variáveis. Ele pode ser advindo de processos de fabricação como produção de carvão vegetal e cocção por exemplo, e também podem ser manufaturados (Gonçalves, 2017).

Este gás possui mais de 200 anos de história, segundo Guerra (2015), entretanto, acabou por perder seu interesse econômico devido ao aparecimento da eletricidade e combustíveis fósseis, reduzindo assim sua utilização a pequenos nichos de mercado.

Como este trabalho irá tratar do gás de síntese produto da gaseificação da biomassa, faz-se necessário um maior foco nesta forma de obtenção, portanto, segundo Lopes *et al* (2019), a

biomassa do ponto de vista energético é definida como toda matéria orgânica, vegetal ou animal que pode ser empregada na geração de energia.

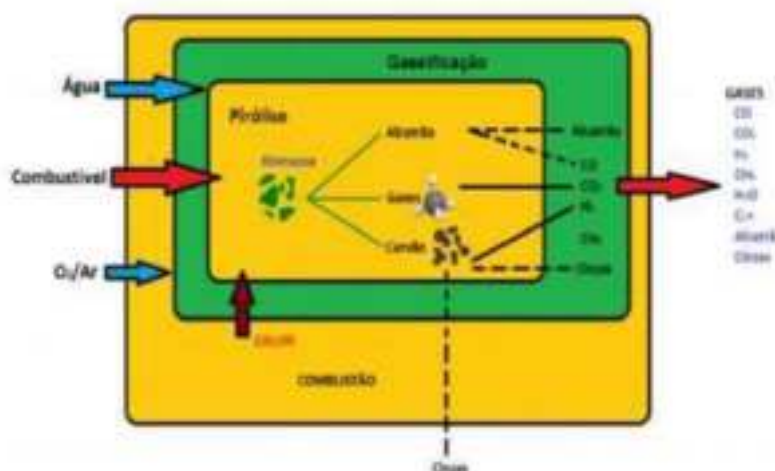
Alguns resíduos da agroindústria como o bagaço de cana, cavacos de madeira, casca de arroz e serragem são exemplos de biomassa. Por meio da combustão direta em fornos e caldeiras a biomassa pode ser utilizada como combustível. A utilização desta fonte como combustível se torna interessante devido aos fatores ambientais pois pode ser utilizada de forma sustentável (Franco e Mendes, 2021).

Existem três mecanismos básicos conhecidos para a conversão da biomassa em energia, de acordo com Mesquita e Menezes (2017), são eles:

- I. **Conversão termoquímica:** processo de combustão direta, gaseificação e pirólise;
- II. **Conversão bioquímica:** consiste na digestão anaeróbica, fermentação/destilação e hidrólise;
- III. **Conversão físico-química:** compressão, extração e esterificação.

Os processos termoquímicos são basicamente processos de combustão parcial, que dão origem a combustíveis de baixo poder calorífico. A diferença entre o processo de pirólise e o processo de gaseificação é a presença de oxigênio (O_2). Na pirólise a combustão é realizada na ausência de ar enquanto na gaseificação a combustão é feita por meio do controle de fornecimento de ar (Santos, 2018). O processo de gaseificação está representado esquematicamente na Figura 19.

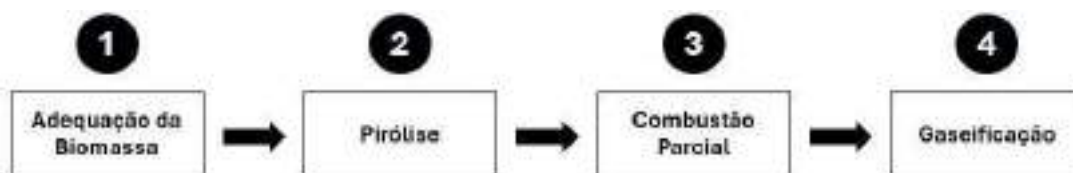
Figura 19 - Processo termoquímico de gaseificação da biomassa.



Fonte: da Silva [1], 2021.

Este processo é composto por quatro etapas básicas: adequação da biomassa, pirólise, combustão parcial e gaseificação conforme Basu (2013) e está representado na Figura 20.

Figura 20 - As quatro etapas básicas do processo de gaseificação da biomassa.



Fonte: Próprio autor, 2024.

O processo de adequação da biomassa é a primeira etapa e antecede sua entrada no gaseificador. Essa etapa consiste na trituração e secagem, sendo esse o procedimento que segrega a parte sólida. As reações químicas e transferências de calor são afetadas por conta do tamanho das partículas no processo de gaseificação. Por este motivo a trituração precisa ser realizada juntamente com a secagem (Basu, 2013). O teor de umidade depende de qual matéria-prima está sendo utilizada no processo. Objetivo da secagem é minimizar o teor de umidade para menos de 2% pois em termos gerais a biomassa compreende uma umidade de 5% a 40%. Quanto menor a umidade, maior é a qualidade do combustível. A secagem não é importante apenas para retirar a umidade, mas também para diminuir a energia fornecida para as etapas posteriores afirma da Silva [1] (2021).

O processo de pirólise (desvolatilização), ou simplesmente, decomposição térmica da biomassa é a segunda etapa do processo. Essa etapa equivale-se à decomposição térmica das moléculas longas na ausência de oxigênio (ar), ou seja, é o processo em que ocorre a quebra das moléculas pesadas. Os produtos dessa reação química são basicamente condensáveis e carvão que são "quebrados" em compostos não condensáveis. São exemplos destes compostos: Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂), Hidrogênio (H₂) e Metano (CH₄). A pirólise ocorre geralmente entre 300°C e 650°C. Os produtos desta etapa estão diretamente ligados à taxa de aquecimento, sendo assim, a pirólise classificada em rápida ou lenta. Na pirólise rápida, devido as elevadas temperaturas, as reações ocorrem de forma rápida. Obtém-se então a produção de combustíveis gasosos e líquidos, pois ocorre um aumento na produção de gases. Por sua vez, na pirólise lenta, analogamente, as reações ocorrem de forma mais lenta em baixa temperatura, e o produto de interesse é o carvão (Basu, 2013; Santos 2018).

Em grande parte das etapas do processo de gaseificação a energia é absorvida em forma de calor, ou seja, é endotérmica. Por esse motivo, para fornecer essa energia ocorre a combustão parcial da matéria. Essa combustão parcial é a terceira etapa do processo. Nessa etapa o carbono da biomassa reage com o oxigênio, gerando o calor demandado pelas outras etapas (Araújo, 2016).

A quarta e última etapa do processo é a gaseificação propriamente dita. Nessa etapa ocorrem reações entre os hidrocarbonetos, dióxido de carbono, hidrogênio, oxigênio e vapor d'água. Somando as reações anteriores seguem as reações químicas envolvendo os gases que foram liberados. Dentre todas, reação mais importante é gaseificação do carvão produzido na etapa da pirólise (segunda etapa). Essa por sua vez, contém uma mistura de hidrocarbonetos (Basu, 2013).

O processo de gaseificação permite obter três diferentes qualidades de gases. Esses gases variam entre: o agente da gaseificação, o método de operação e as condições de operação do processo (Mckendry, 2002b). O agente principal de gaseificação é geralmente o ar. Entretanto, é possível utilizar hidrogênio e oxigênio. A gaseificação que utiliza o ar como agente gaseificante produz um gás de baixo poder calorífico (entre 4 e 6 MJ/Nm^3). Caso o agente seja o oxigênio puro, é possível obter um gás de maior poder calorífico (entre 10 e 20 MJ/Nm^3). E quando se utiliza o hidrogênio, o gás gerado é de alto poder calorífico (entre 20 e 40 MJ/Nm^3). Entretanto, o que limita a produção de gases de síntese de alto poder calorífico são os fatores econômicos (Rocha *et al*, 2022).

Para que o *syngas* (gás de síntese) seja efetivamente utilizado, segundo Lora *et al* (2004), é necessário que seja removido os contaminantes presentes. Esses contaminantes são: partículas sólidas, metais alcalinos, alcatrão, sulfeto de hidrogênio e amônia. Esses contaminantes por sua vez podem causar graves problemas durante a operação dos equipamentos alimentados pelo *syngas*. Dessa forma, o biocombustível é submetido a uma limpeza, utilizando filtragens, lavagens e resfriamentos. Neste processo ocorre o grande aproveitamento da biomassa, entre 60% e 90% da energia (Santos, 2018).

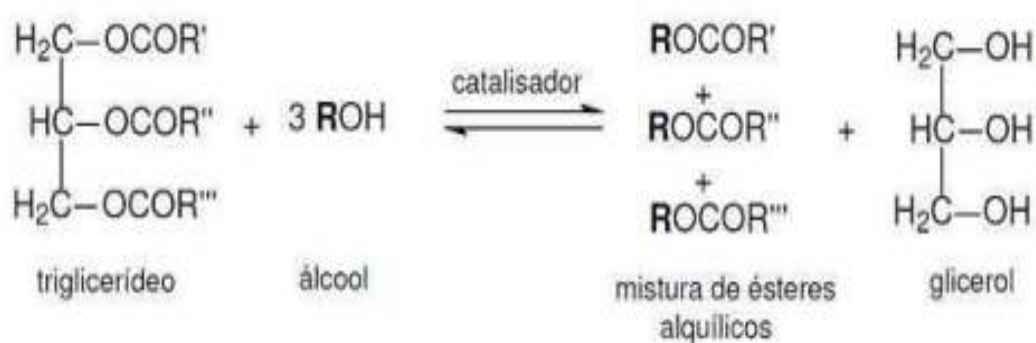
Outro processo de conversão da biomassa em energia citado anteriormente é o processo bioquímico de digestão anaeróbica. Esse processo produz o biogás. Vane (2016) diz que esse combustível é originário da decomposição da matéria orgânica encontrada em aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto. Os principais componentes deste combustível são o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2). O metano pode variar entre 40% e 70%, quanto mais elevado for, maior o poder calorífico o biogás terá. Para que se mantenha a qualidade do biogás é de extrema importância a remoção parcial do dióxido de carbono e dos demais componentes,

pois quanto maior for a quantidade destes compostos, menor será o poder calorífico (Alves, 2000). A manutenção desses componentes não afeta apenas o PC mas também o funcionamento do motor. Por exemplo, o gás sulfídrico (H_2S) é corrosivo e não pode ultrapassar 0,05% em volume no biogás (Rocha *et al*, 2022).

Por fim, o último processo de conversão é o de conversão físico-química. É aquele em que utiliza técnicas de compressão e extração de óleos vegetais de oleaginosas para modificação química através do processo de óleos utilizando a esterificação. Esses óleos vegetais esterificados podem ser utilizados em motores de combustão interna pois se adaptam as propriedades do combustível, mas por sua vez, às exigências dos motores de ciclo Diesel (MME:EPE, 2007). Os óleos podem ser obtidos de espécies oleaginosas do cultivo de girassol por exemplo, e também de origem animal. No Brasil, as principais matérias-primas são o óleo de soja e o sebo bovino. Esses materiais são compostos basicamente por triacilglicerídeos, ou seja, três cadeias carbônicas longas derivadas de ácidos graxos ligados na forma de ésteres a uma molécula de glicerol (Rocha *et al*, 2022).

Para a produção do biodiesel é utilizado o processo de transesterificação apresentado na Figura 21. Nesta reação, um óleo ou uma gordura reagem com uma solução alcoólica na presença de um catalisador ácido ou básico, o catalisador básico é o mais utilizado por sua melhor eficiência (Machado, 2013). Como produto desta reação têm-se a glicerina (glicerol) e uma mistura de ésteres de ácidos graxos, ou seja, o biodiesel (Santos *et al*, 2015).

Figura 21 - Processo de transesterificação.

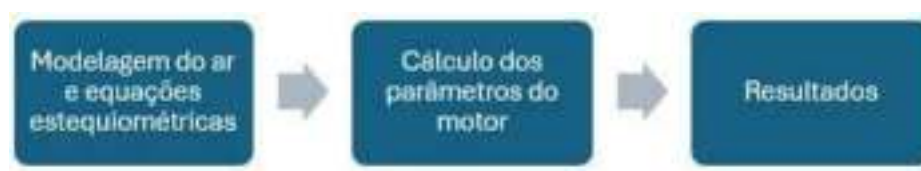


Fonte: Machado (2013).

3 METODOLOGIA

A metodologia desse trabalho consiste em um estudo teórico e quantitativo para a análise técnica e comparativa dos combustíveis abordados. A mesma, foi dividida em três etapas conforme Figura 22. Portanto, a primeira etapa consistiu em modelar o ar e obter as equações estequiométricas da combustão de cada combustível para a obtenção das massas molares e cálculos das relações ar-combustível. Em seguida, na segunda etapa, foi-se calculado os parâmetros do motor utilizando-se das equações apresentadas anteriormente. Por fim, na terceira e última etapa foi-se gerados gráficos e tabelas para análise e comparação.

Figura 22 - As três etapas da metodologia do estudo.



Fonte: Próprio autor (2024).

O estudo partiu, portanto, da modelagem dos reagentes e dos produtos resultantes das reações químicas da combustão. Para isso, foi necessário assumir algumas condições simplificadoras:

- A gasolina modelada como octano (C_8H_{18}) (Moral *et al*, 2014);
- O gás natural veicular (GNV) modelado como metano (CH_4);
- O gás de síntese produto da gaseificação da biomassa. Composição do gás: 16,0% de H_2 , 20,0% de CO , 13,0% de CO_2 , 3,0% de CH_4 e 48,0% de N_2 (Xavier, 2016)
- O ar modelado como seco com a seguinte composição: oxigênio (O_2) e Nitrogênio (N_2). Na proporção de 21% e 79% respectivamente (Moral *et al*, 2014);
- O nitrogênio é considerado como um elemento inerte;
- O ar não possui vapor d'água (ar seco);
- A combustão é considerada completa.
- O motor utilizado foi o motor do veículo Fiat Siena Tetrafuel 1.4

O primeiro passo foi estabelecer a razão molar do Nitrogênio (N_2) em relação ao Oxigênio (O_2). Por meio dessa razão, foi possível identificar quantos mols de Oxigênio estava associado

a determinado número de mols de Nitrogênio. Com isso, foi possível obter o valor da massa molar do ar.

Em seguida, foram estabelecidas as equações estequiométricas da combustão para os três combustíveis em análise utilizando as composições apresentadas nas condições simplificadoras acima. Uma vez realizada a estequiometria para as reações de combustão de cada combustível, foi possível calcular a quantidade de reagentes necessária para a combustão completa, ou seja, foi possível calcular a relação ar-combustível em base molar estequiométrica (\overline{RM}_e) por meio da Equação 01 e obter as massas molares de cada combustível.

Após obtida a relação ar-combustível em base molar estequiométrica (\overline{RM}_e), utilizou-se a Equação 02 para realizar a conversão para base mássica estequiométrica, obtendo assim, os valores da relação ar-combustível em base mássica estequiométrica (RM_e) para todos os três combustíveis em estudo.

Para dar prosseguimento nos cálculos dos demais parâmetros do motor operando com cada combustível em análise foi necessário que se estabelecesse alguns valores pertinentes ao motor operando com gasolina, GNV e gás de síntese. Os parâmetros pertinentes foram: rendimento térmico efetivo (η_{tef}), rendimento indicado (η_{ind}) e coeficiente de excesso de ar (λ) adotados conforme Martins (2020), potência efetiva (W_{efet}) adotada conforme ficha técnica do fabricante disponível em Carros na Web (2024), poderes caloríficos inferiores (PCI) da gasolina e GNV adotado conforme Santos (2018) e poder calorífico inferior (PCI) do gás de síntese adotado conforme Xavier (2016).

Os valores dos parâmetros citados acima para a gasolina, para o GNV e para o gás de síntese, estão presentes na Tabela 02

Tabela 2 - Parâmetros adotados pertinentes para o motor operando com gasolina, GNV e gás de síntese.

Parâmetros	Gasolina	GNV	Gás de Síntese
Rendimento térmico efetivo (η_{tef})	25%	27%	27%
Rendimento indicado (η_{ind})	38%	39,7%	39,7%
Coeficiente de excesso de ar (λ)	1,4 [-]	1,4 [-]	1,4 [-]
Potência efetiva (W_{efet})	62,517 [kW]	55,168 [kW]	“Será Calculado”
Poder calorífico inferior (PCI)	43,448 [MJ/kg]	47,141 [MJ/kg]	0,467 [MJ/kg]

Fonte: Próprio autor (2024).

O coeficiente de excesso de ar (λ) juntamente com a Equação 03, obteve-se a relação ar-combustível em base mássica (RM_e) para os combustíveis.

As vazões mássicas de ar (\dot{m}_{ar}) foram calculadas utilizando a Equação 05. Como o gás de síntese é um combustível gasoso, assim como o GNV, foi considerada a mesma vazão mássica de ar para ambos os combustíveis. Portanto, foi calculada para o gás natural veicular e o resultado encontrado foi considerado também para o *syngas*.

Para a gasolina e o gás natural veicular, a vazão mássica de combustível (\dot{m}_{comb}) foram calculadas conforme a Equação 04. Para o gás de síntese, foi utilizada a Equação 06 para o cálculo da vazão mássica do *syngas* (\dot{m}_{syngas}).

Em seguida, foram calculadas as potências do motor. Para o cálculo da potência efetiva (W_{efet}) foi utilizada a Equação 07 para todos os três combustíveis em análise. A potência térmica (W_{term}) foi calculada conforme a Equação 08 tanto para gasolina quanto para o GNV. E a Equação 09 foi utilizada para o *syngas*. A potência indicada (W_{ind}) foi calculada conforme a Equação 10 para todos os combustíveis em análise.

Por fim, o rendimento mecânico (η_{me}) foi calculado utilizando a Equação 11 também para todos os combustíveis em estudo.

Por meio dessa metodologia, foram obtidos os valores que se seguem no próximo item deste presente trabalho de conclusão de curso. Todos os cálculos foram realizados por meio do Microsoft Excel. Para uma melhor análise, foram elaborados tabelas e gráficos também utilizando esta ferramenta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As proporções dos elementos presentes nas considerações simplificadoras, a razão molar do Nitrogênio (N) em relação ao Oxigênio (O) obtida foi de 3,76 mols conforme apresentado na Equação 12.

$$\frac{N}{O} = \frac{\%N}{\%O} = \frac{\left(\frac{79}{100}\right)}{\left(\frac{21}{100}\right)} = 3,76 \text{ mols} \quad (12)$$

Este resultado implica em dizer que cada mol de O₂ é associado a 3,76 mols de N₂. Portanto, 1 mol de oxigênio equivale a 4,76 mols de ar. Portanto, a massa molar do ar encontrada foi de 28,840 (kg/kmol) em acordo com Moran *et al* (2013). Este resultado subsidiou os cálculos das massas molares de cada combustível em análise.

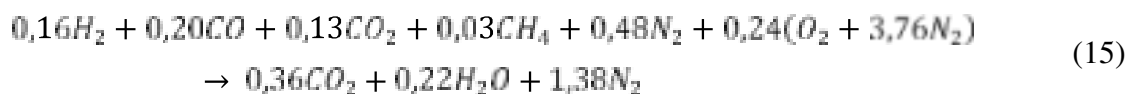
A equação estequiométrica da gasolina devidamente equilibrada utilizando as proporções do modelo das condições simplificadoras encontra-se a seguir na Equação 13. A massa molar obtida para este combustível foi de 114,220 (kg/kmol) conforme apresenta Moran *et al* (2013).



Para o gás natural veicular (GNV), a equação estequiométrica se encontra abaixo por meio da Equação 14. Para esse combustível, a massa molar obtida foi de 16,040 (kg/kmol) também em acordo com Maran *et al* (2014).



Para o combustível alternativo, o gás de síntese, a equação estequiométrica obtida se encontra a seguir na Equação 15. Para esse gás, a massa molar obtida está em conformidade com a literatura, segundo Xavier (2016), a massa molar deste combustível é em média, 25,657 (kg/kmol).



Por meio da Equação 01 e as equações estequiométricas, foram calculadas as relações ar-combustível em base molar estequiométrica (\overline{RM}_e) para os combustíveis.

O resultado obtido para a gasolina foi de 59,500 ($kmol/kmol$) conforme a seguir.

$$\overline{RM}_e = 59,500 \frac{kmol (ar)}{kmol (comb)}$$

Para o GNV, o resultado obtido foi de 9,520 ($kmol/kmol$) conforme o cálculo a seguir.

$$\overline{RM}_e = 9,520 \frac{kmol (ar)}{kmol (comb)}$$

Para o *syngas* (gás de síntese), de acordo com o cálculo a seguir, o valor para a relação em base molar estequiométrica calculado foi de 1,142 ($kmol/kmol$).

$$\overline{RM}_e = 1,142 \frac{kmol (ar)}{kmol (comb)}$$

Para realizar a conversão da relação ar-combustível em base molar estequiométrica (\overline{RM}_e) para a relação ar-combustível em base mássica estequiométrica (RM_e) foi utilizada a Equação 02. Dessa forma, o resultado da relação ar-combustível em base molar estequiométrica é multiplicado pelo quociente entre a massa molar do ar pela massa molar do combustível obtidos anteriormente.

O resultado obtido para a gasolina foi de 15,020 (kg/kg) conforme a seguir.

$$RM_e = 59,500 \cdot \frac{28,840}{114,220} = 15,020 \frac{kg (ar)}{kg (comb)}$$

Para o GNV, o valor obtido após a conversão foi de 17,117 (kg/kg).

$$RM_e = 9,520 \cdot \frac{28,840}{16,040} = 17,117 \frac{kg (ar)}{kg (comb)}$$

Para o gás de síntese, o valor obtido foi 1,284 (kg/kg) de acordo com o cálculo a seguir.

$$RM_g = 1,142 \cdot \frac{28,840}{25,567} = 1,284 \frac{kg (ar)}{kg (comb)}$$

Utilizando a Equação 03, foi possível encontrar a relação ar-combustível em base mássica (RM). Para este cálculo é necessário utilizar o coeficiente de excesso do ar (λ) disponível na Tabelas 2. Esse valor é multiplicado pela relação ar-combustível em base mássica estequiométrica (RM_s) obtida anteriormente.

Portanto, a relação ar-combustível em base mássica (RM) obtida para a gasolina foi de 21,033 (kg/kg) conforme o cálculo a seguir.

$$RM = 1,4 \cdot 15,020 = 21,033 \frac{kg (ar)}{kg (comb)}$$

Para o GNV, a relação ar-combustível em base mássica (RM) obtida, conforme o cálculo realizado, foi de 23,984 (kg/kg).

$$RM = 1,4 \cdot 17,117 = 23,984 \frac{kg (ar)}{kg (comb)}$$

Por fim, para o gás de síntese, a relação ar-combustível em base mássica (RM) obtida foi de 1,797 (kg/kg).

$$RM = 1,4 \cdot 1,284 = 1,797 \frac{kg (ar)}{kg (comb)}$$

Analisando os resultados obtidos da relação ar-combustível em base mássica (RM) dos combustíveis, notou-se que o gás de síntese apresentou o menor valor dentre os três combustíveis analisados. Portanto, segundo a literatura, de acordo com Franco e Mendes (2021), quanto menor a relação, maior será o consumo específico de combustível.

Os cálculos de vazão mássica de ar (\dot{m}_{ar}), vazão mássica de combustível (\dot{m}_{comb}) e potência térmica (\dot{W}_{term}) foram realizados em conjunto pois utilizam equações em que os resultados se interdependem.

Para a gasolina, para obter o valor da vazão mássica de combustível (\dot{m}_{comb}) foi utilizada a Equação 04. Por sua vez, um dos valores de entrada é o a potência térmica (\dot{W}_{term}). Portanto, para obter o valor da vazão mássica de combustível (\dot{m}_{comb}), foi necessário realizar primeiro o cálculo da potência térmica (\dot{W}_{term}) conforme a Equação 08.

Dessa forma, para o cálculo da potência térmica (\dot{W}_{term}), foram utilizados os valores da potência efetiva (\dot{W}_{efet}) e rendimento efetivo (η_{ef}) disponibilizados na Tabela 02. O resultado obtido para a potência térmica (\dot{W}_{term}) da gasolina foi de 250,068 (kW).

$$\dot{W}_{term} = \frac{62,517}{0,25} = 250,068 \text{ kW}$$

Em posse do valor de potência térmica (\dot{W}_{term}), utilizando a Equação 04, com o valor do PCI disponibilizado na Tabela 02. O valor obtido para a vazão mássica de combustível (\dot{m}_{comb}) para a gasolina foi de 5,756.10⁻³ (kg/s).

$$\dot{m}_{comb} = \frac{250,068}{43448} = 5,756 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Com os resultados obtidos acima, foi possível, por fim, calcular a vazão mássica de ar (\dot{m}_{ar}) da gasolina. Utilizou-se, portanto, a Equação 05 que consiste na multiplicação entre a relação ar-combustível em base mássica (RM) obtida e a vazão mássica de combustível (\dot{m}_{comb}). Dessa forma, o valor obtido para a vazão mássica de ar (\dot{m}_{ar}) para a gasolina foi de 0,121 (kg/s).

$$\dot{m}_{ar} = 5,756 \cdot 10^{-3} \cdot 21,028 = 0,121 \text{ kg/s}$$

O mesmo processo descrito anteriormente, foi realizado para o GNV. Primeiro, foi realizado o cálculo da potência térmica (\dot{W}_{term}) conforme a Equação 08 e utilizando os valores também disponíveis na Tabela 02. A potência térmica (\dot{W}_{term}) encontrada para o GNV foi de 204,326 (kW).

$$\dot{W}_{term} = \frac{55,168}{0,27} = 204,326 \text{ kW}$$

A vazão mássica de combustível (\dot{m}_{comb}) para o GNV foi obtida por meio da Equação 04 e utilizando o valor do PCI disponibilizado na Tabela 02. O resultado para vazão mássica de combustível (\dot{m}_{comb}) foi de $4,334 \cdot 10^{-3}$ para o gás natural veicular.

$$\dot{m}_{comb} = \frac{204,326}{47141} = 4,334 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Utilizando o resultado anterior da vazão mássica de combustível (\dot{m}_{comb}) multiplicado pela relação ar-combustível em base mássica (RM) obtida para o GNV, conforme a Equação 05, obteve-se a vazão mássica de ar (\dot{m}_{ar}) de $0,104$ (kg/s).

$$\dot{m}_{ar} = 4,333 \cdot 10^{-3} \cdot 23,968 = 0,104 \text{ kg/s}$$

Para o *syngas*, o processo difere-se um pouco. Como o GNV e o gás de síntese são combustíveis gasosos, o valor da vazão mássica (\dot{m}_{ar}) obtido para o gás natural veicular será considerado também o para o gás de síntese. Portanto, a vazão mássica para o gás de síntese encontrado, foi de $0,104$ (kg/s).

A vazão mássica de combustível do *syngas* (\dot{m}_{syngas}) foi calculada conforme a Equação 06. Utilizou-se neste cálculo o quociente entre a vazão mássica de ar (\dot{m}_{ar}) pela relação ar-combustível em base mássica (RM) obtidas para o gás de síntese. O resultado encontrado para a vazão mássica de combustível do *syngas* (\dot{m}_{syngas}) foi de $57,870 \cdot 10^{-3}$ (kg/s).

$$\dot{m}_{syngas} = \frac{0,104}{1,797} = 57,870 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

A potência térmica (\dot{W}_{term}) para o gás de síntese foi calculada conforme a Equação 09. Para este cálculo, utilizou-se a vazão mássica do combustível do *syngas* (\dot{m}_{syngas}) obtido anteriormente e o PCI disponibilizado na Tabela 02. Portanto, o valor calculado foi de $270,251$ (kW).

$$\dot{W}_{term} = 57,87 \cdot 10^{-3} \cdot 4670 = 270,251 \text{ kW}$$

Analisando os resultados obtidos, observou-se que o gás de síntese dentre os três combustíveis apresentou-se mais eficiente na conversão de energia térmica em mecânica, pois

o valor de potência térmica (\dot{W}_{term}) foi o maior obtido. Entretanto, comprovando a literatura, o gás de síntese dentre os combustíveis analisados é o que demanda maior vazão mássica de combustível.

Para todos os três combustíveis foi calculada a potência indicada (\dot{W}_{ind}) conforme a Equação 10. Para os valores de entrada, para a gasolina, utilizou-se a Tabela 02 para o rendimento indicado (η_{ind}) e a potência térmica (\dot{W}_{term}) obtida anteriormente. Sendo assim, o valor da potência indicada (\dot{W}_{ind}) obtida para a gasolina foi de 94,526 (kW).

$$\dot{W}_{ind} = 250,068 \cdot 0,38 = 94,526 \text{ kW}$$

Para o gás natural veicular, o valor do rendimento indicado (η_{ind}) encontra-se na Tabela 02. Multiplicando este valor pela potência térmica (\dot{W}_{term}) obtida, conforme Equação 10, obteve-se o resultado de 81,117 (kW) de potência indicada (\dot{W}_{ind}) para o GNV.

$$\dot{W}_{ind} = 204,326 \cdot 0,397 = 81,117 \text{ kW}$$

O valor do rendimento indicado (η_{ind}) para o gás de síntese encontra-se na Tabela 02. Por meio da Equação 10, utilizando o valor da potência térmica (\dot{W}_{term}) obtida anteriormente, o resultado para a potência indicada (\dot{W}_{ind}) para o *syngas* foi de 107,289 (kW).

$$\dot{W}_{ind} = 270,251 \cdot 0,397 = 107,289 \text{ kW}$$

Pode-se observar que o gás de síntese apresentou maior potência indicada (\dot{W}_{ind}) dentre os três combustíveis analisados. Isso representa que o *syngas* proporciona a geração de maior energia no motor antes de considerar as perdas devido ao atrito e outros fatores.

Por fim, o rendimento mecânico (η_{me}) foi calculado para os combustíveis, conforme Equação 11, com o intuito de verificar qual deles possui o maior percentual de energia mecânica no pistão convertida em energia mecânica no volante do motor. Os valores de entrada para a gasolina foram o rendimento efetivo (\dot{W}_{efet}) disponível na Tabela 02 e o valor da potência indicada (\dot{W}_{ind}) calculado anteriormente. O produto desta multiplicação resultou no valor de 66,138 (%) de rendimento mecânico (η_{me}) para a gasolina.

$$\eta_{mec} = \frac{62,517}{94,525} = 66,138\%$$

Para o gás natural veicular, o valor da potência efetiva (W_{efet}) foi disponibilizado na Tabela 02. Multiplicando este valor pela potência indicada (W_{ind}) calculada anteriormente, de acordo com a Equação 11, obteve-se o valor de 68,010 (%) de rendimento mecânico (η_{mec}) para o GNV.

$$\eta_{mec} = \frac{55,168}{81,117} = 68,010 \%$$

Para o gás de síntese, o valor da potência efetiva (W_{efet}) foi calculado conforme a Equação 07. Portanto, o resultado obtido foi de 72,968 (kW).

$$W_{efet} = 0,27 \cdot 270,251 = 72,968 \text{ kW}$$

O valor da potência indicada (W_{ind}) foi calculada anteriormente, de acordo com a Equação 11, o quociente entre a potência efetiva (W_{efet}) e a potência indicada (W_{ind}), resultou também no percentual de 68,010 (%) de rendimento mecânico (η_{mec}) para o *syngas*.

$$\eta_{mec} = \frac{72,968}{107,289} = 68,010 \%$$

Observou-se que o GNV obteve o maior resultado de rendimento mecânico (η_{mec}) juntamente com o gás de síntese. A gasolina por sua vez, para este parâmetro, possui o menor valor embora muito próximo dos outros dois combustíveis. Isso implica em dizer que o gás de síntese e o GNV possuem uma porcentagem maior de energia mecânica no pistão convertida em energia mecânica no volante do motor se comparado a gasolina.

A seguir, encontra-se a Tabela 03 que sumariza os resultados dos parâmetros obtidos para os três combustíveis analisados.

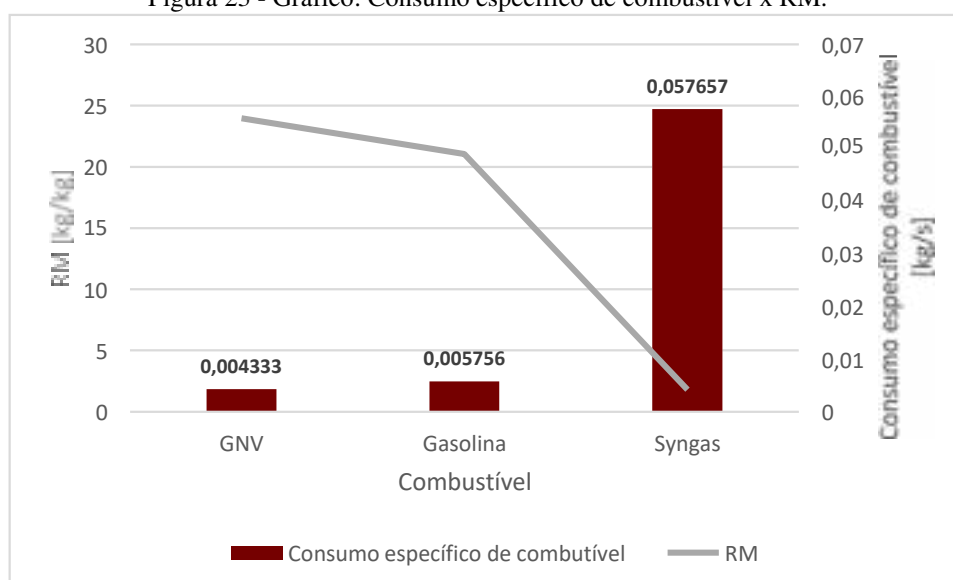
Tabela 3 - Resultado obtidos.

Parâmetros	Gasolina	GNV	Gás de Síntese
(\overline{RM}_p)	59,500 <i>kmol/kmol</i>	9,520 <i>kmol/kmol</i>	1,142 <i>kmol/kmol</i>
(RM_p)	15,020 <i>kg/kg</i>	17,117 <i>kg/kg</i>	1,284 <i>kg/kg</i>
(RM)	21,033 <i>kg/kg</i>	23,964 <i>kg/kg</i>	1,797 <i>kg/kg</i>
$(W_{L_{eff}})$	250,068 <i>kW</i>	204,326 <i>kW</i>	270,251 <i>kW</i>
(W_{ind})	94,525 <i>kW</i>	81,117 <i>kW</i>	107,289 <i>kW</i>
(W_{efet})	62,517 <i>kW</i>	55,168 <i>kW</i>	72,968 <i>kW</i>
(\dot{m}_{comb})	5,756.10 ⁻³ <i>kg/s</i>	4,334.10 ⁻³ <i>kg/s</i>	57,870.10 ⁻³ <i>kg/s</i>
(\dot{m}_{ar})	0,121 <i>kg/s</i>	0,104 <i>kg/s</i>	0,104 <i>kg/s</i>
(η_{mec})	66,138 %	68,010 %	68,010 %

Fonte: Próprio autor (2024).

Com base nos resultados fornecidos acima, pode-se concluir que a relação ar-combustível em base mássica (RM) do gás de síntese foi a mais baixa entre os três combustíveis examinados. Quanto menor o valor deste parâmetro, maior é a vazão mássica de combustível (\dot{m}_{comb}). Portanto, uma quantidade extremamente significativa de *syngas* é necessária para o funcionamento do motor. Esta análise é ilustrada na Figura 23.

Figura 23 - Gráfico: Consumo específico de combustível x RM.

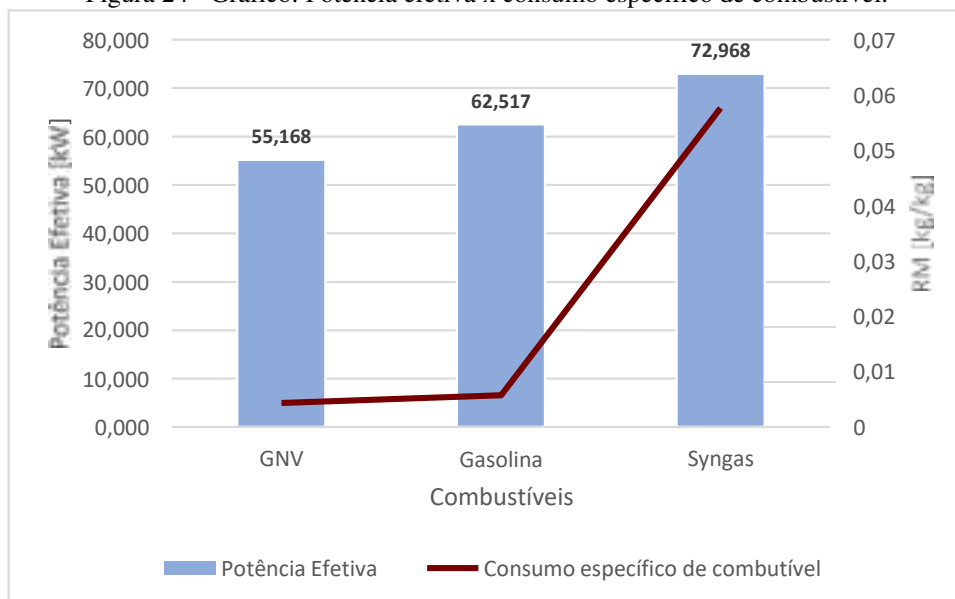


Fonte: Próprio autor (2024).

Além disso, foi observado que, entre os três combustíveis analisados, o *syngas* apresentou o maior valor de potência efetiva (W_{efet}). No entanto, para alcançar esse valor, é

necessário um volume extremamente alto do gás de síntese, conforme demonstrado na Figura 24.

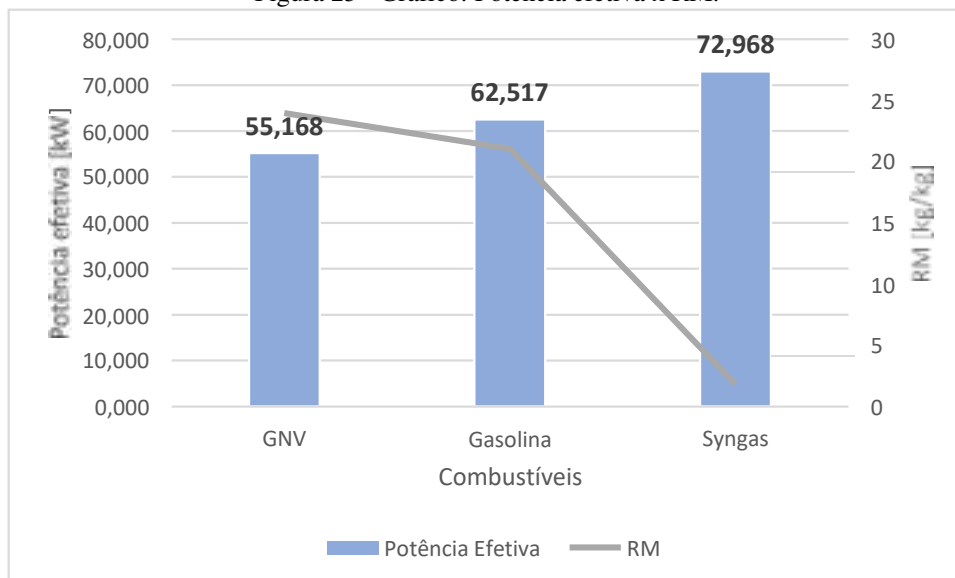
Figura 24 - Gráfico: Potência efetiva x consumo específico de combustível.



Fonte: Próprio autor (2024).

E também, foi possível constatar que quanto menor a relação ar-combustível em base mássica (RM), maior a potência efetiva (W_{efet}) conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 - Gráfico: Potência efetiva x RM.



Fonte: Próprio autor (2024).

5 CONCLUSÃO

O gás de síntese se mostrou mais eficiente na conversão de energia térmica em energia mecânica pois seu valor de potência térmica ($\dot{W}_{\text{térmica}}$) foi superior aos demais combustíveis com 270,251 (kW). Para este parâmetro, a gasolina ficou em segundo lugar com 250,068 (kW) e o gás natural veicular em terceiro com 204,326 (kW).

O combustível com maior energia produzida pelo motor antes de considerar as perdas devido a atrito e outros fatores, é o gás de síntese. Pois foi o combustível com maior potência indicada (\dot{W}_{ind}) com 107,289 (kW). O segundo combustível com maior potência indicada (\dot{W}_{ind}) foi a gasolina com 94,525 (kW) e em terceiro o GNV com 81,117 (kW).

O combustível com maior capacidade de converter a energia química do combustível em energia mecânica utilizável, ou seja, com o maior valor de potência efetiva (\dot{W}_{efet}), foi o gás de síntese com 72,968 (kW). Com a gasolina também ficando em segundo lugar com 62,517 (kW) o GNV em terceiro com 55,168 (kW).

Com relação ao rendimento mecânico (η_{me}), que é o percentual de energia mecânica nos pistões que é convertido em energia mecânica no volante do motor, o gás de síntese e o gás natural veicular foram os combustíveis que apresentaram os maiores valores para este parâmetro com 68,010 (%). Em terceiro, foi a gasolina com 66,138 (%). Entretanto, os valores foram próximos.

Em resumo, para um valor pré-fixado de vazão mássica, pode-se observar que o *syngas* apresentou maiores valores para os parâmetros de desempenho do motor comparado aos demais combustíveis. Portanto, o gás de síntese apresentou viabilidade em ser utilizado como combustível para motores de combustão interna. Notavelmente a potência efetiva foi superior aos demais combustíveis. Entretanto, para que se obtenha tais valores para os parâmetros apresentados é necessária uma grande vazão mássica de combustível, que por sua vez, foi a maior vazão dentre os três combustíveis em análise com o valor de $57,8701 \cdot 10^{-3}$ (kg/s) enquanto a gasolina obteve um valor de $5,7561 \cdot 10^{-3}$ (kg/s) e o GNV um valor de $4,3341 \cdot 10^{-3}$ (kg/s). Por essa razão, a aplicação deste combustível em motores veiculares é inviável. A necessidade de um grande reservatório de gás impossibilita a aplicação em motores automotivos. Porém a aplicação em motores estacionários pode ser considerada. Para essa aplicação, faz-se necessário análise dos aspectos construtivos do motor e as adaptações necessárias para o uso do *syngas*.

Vale ressaltar que o gás de síntese, conforme apresentado neste trabalho, pode ser produzido a partir de uma variedade de biomassas, incluindo resíduos urbanos e subprodutos

de processos industriais. Trabalhos futuros poderão realizar estudos comparativos entre diferentes tipos de gases de síntese e verificar suas aplicações em motores estacionários bem como adaptações necessárias para sua utilização e analisar estratégias de reaproveitamento em processos industriais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S. G. C. **Valorização de biomassa residual da cana-de-açúcar através de processos termoquímicos**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista- UNESP, 2020.
- ALVARENGA, A. A., DANTAS, A. T. **O Brasil no contexto das guerras por recursos: o caso do petróleo**. Revista del CESLA, p. 377-390, 2020.
- ALVES, J. L. F. **Valorização de resíduos agroindustriais de mamona e de algaroba por meio de processo de pirólise**. Dissertação de pós-graduação. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. São Paulo: 2000. 142 p. (PIPGE/USP, M.S., Energia, 2000).
- AMARAL, L. V.; FERREIRA, A. G. **Combustíveis, combustão e motores de combustão interna uma revisão sistêmica**. Belo Horizonte: Poisson, 2024.
- ARAÚJO, R. M. S. **Estudo comparativo de processos de gaseificação de resíduos sólidos urbanos no Brasil**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2016.
- AVELINO, C. E. de J. **Funcionamento de motores**. Trabalho de conclusão de curso. Instituição Pitágoras Sistema de Educação Soc. Ltda. Poços de Caldas, 2018.
- BASU, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory**. Academic Press, 2013.
- BIZERRA, A. M. C., DE QUEIROZ, J. L. A., COUTINHO, D. A. M. **O impacto ambiental dos combustíveis fósseis e dos biocombustíveis: as concepções de estudantes do ensino médio sobre o tema**. Revista brasileira de educação ambiental (Revbea) V.13, p. 299-315, São Paulo, 2018
- BORIN, B. M. **Avaliação computacional da operação de um motor de ignição por centelha AP 1.8L utilizando o método de análise de três pressões**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2023.
- BOUKHARI, H. EL B. **Estudio y mejora de un motor wankel**. Trabalho de conclusão de curso. Escola politécnica Superior d'Enginyeria de Manresa, 2021.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2007
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão Interna volume 1**. São Paulo. Blucher Editora, 2014.

CAMARGO, M. N, SCHLOSSER, J. F., GODOY, L. P., STEFANO, N. M. **Ciclo real de um motor de ignição por compressão que trabalha em regime bicombustível: diesel e gás natural**. Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal) v. 22, p. 87-95, 2013.

CARDOSO, W. DA S. et al. **Motor de combustão interna de pistões rotativos triangulares curvilíneos: wankel**. Rev. Esfera Acadêmica Tecnologia v.1, n.1, 2016.

CARROS NA WEB. **Ficha Técnica Fiat Siena Tetrafuel 1.4**. 2024 Disponível em: <carrosnaweb.com.br/fichadetalhe.asp?codigo=5062>. Acesso em: Março de 2024.

CARVALHO, N. L., BORTOLINI, J. G., BARCELLOS, A. L. **Biocombustíveis: uma opção para o desenvolvimento sustentável**. Revista GEDECON (Gestão e Desenvolvimento em Contexto), v.2, p. 32-50, 2014.

ÇENGEL, Y. A., BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 5a Edição, McGraw Hill, São Paulo, 2006.

COSTA, J. S. **Biomassa residual para uso energético no Estado do Pará**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2018.

DA COSTA, Y. J. R. **Análises energética e exergética de um motor de combustão interna operando com mistura diesel e gás natural**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos)– Universidade Federal de Campina Grande/Centro de Ciências e Tecnologia-PB. 2007.

DA SILVA, E. C. **Análise termodinâmica e reprojeto de um motor a vapor**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Maria-RS, 2019.

DA SILVA, K. S. et al. **Tipos de combustíveis**. Revista Ibero – Americana de Humanidades, Ciências e Educação-REASE. V.8, n.06, p. 1439-1454. 2022.

DA SILVA, N. R. **Metodologia para determinação da potência indicada em motores de combustão interna**. Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2006.

DA SILVA [1], V. F. **Processos termoquímicos de conversão de biomassa**. Dissertação de mestrado. Instituto politécnico de Bragança Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Bragança, 2021.

DA SILVA [2], W. P. **Utilização do gás natural veicular no Brasil**. Trabalho de conclusão de curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. Manaus, 2021.

DAL BEM, A. J. **Análise de desempenho de um motor ciclo Otto alimentado com álcool de 75 INPM**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, 2008.

DE ABREU, H. L. C. **Motores de aviação convencionais e a reação**. Palhoça-SC: UnisulVirtual, 2013.

DE ALBUQUERQUE, L. E. N. **Automatização de um dinamômetro hidráulico para ensaios de motores de combustão interna**. dissertação de mestrado. Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília-DF, 2015.

DE CARVALHO, M. A. S. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. Dissertação de pós-graduação. Universidade Federal da Bahia, 2011.

DE FARIA, L. P. **Sistema de arrefecimento motor ciclo Otto: comparativo entre dois sistemas**. Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2022.

DE OLIVEIRA, C. R. **Viabilidade técnica e econômica do uso do gás natural veicular comparado ao uso da gasolina em veículos automotores**. Trabalho de conclusão de curso. Centro Universitário do Sul de Minas-UNIS. Varginha, 2018.

DE OLIVEIRA, J. F., MOREIRA, F. S. **Contribuição para ensaios com motor Stirling**. Revista Científica Eletrônica Gesto Debate. Vol. 24, p. 80-114. 2023.

DE SOUSA, F. B. **Motocicleta Honda CG Titan 150cc: Carburador e Injeção Eletrônica**. Trabalho de conclusão de curso. Centro Universitário do Sul de Minas UNIS MG. Varginha, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético Nacional (BEN) 2023: ano base 2022**. Disponível em: < <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional/ben-2023/relatorio-final/ben2023.pdf/view>> Acessado em: Fevereiro de 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz energética e elétrica**. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> Acessado em: Fevereiro de 2024.

FERAZZA, H. **Análise de temperatura em um motor de combustão com arrefecimento a ar utilizando sensores baseados em redes de bragg em fibras óticas**. Dissertação de mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2022.

FRANCO, M. B., MENDES, T. **Estudo comparativo entre combustíveis para motores de combustão interna**. In: Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Diamantina-MG UFVJM, 2021.

FURTADO, G. M. **Análise dos efeitos elásticos e viscosos em uma cavidade através da aproximação por elementos finitos**. XXV Salão de Iniciação científica- UFRGS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

GONÇALVES, A. L. **Utilização de biomassa liquefeita na produção eletrolítica de gás de síntese**. Dissertação de mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2017.

GONÇALVES, M. **Sistemas de arrefecimento**. Verso Assessoria de imprensa. 2014. Disponível em: < <https://versoassessoriaimprensa.com.br/sistemas-de-arrefecimento/>> Acesso em: Dezembro de 2023.

GUERRA, L. F. S. **Eletrólise da água para produção de gás de síntese**. Dissertação de mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2015.

HABITZREITER, T. L. et al. **Poder calorífico e análise econômica do uso total ou parcial da biomassa de Eucaliptos**. Scientia Agraria Paraensis, v. 18, n. 3, p. 282-288, 2019.

HEYWOOD, J. B. **Internal combustion engine fundamentals**. 2ª ed. Mc Graw Hill Education. 2018.

JÚNIOR, E. S. DE S., SOUZA, M. DA S. R. **Gás natural veicular**. Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense. V. 2, n. 1, p. 335-340, 2012.

LOPES, J. M. P. **O motor Stirling: passado e presente**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas. Ouro Preto, 2023.

LOPES, K., MARTINS, E. M., DE MIRANDA, R. L. **A potencialidade energética da biomassa no Brasil**. Revista Desenvolvimento Socioeconômico em Debate-RDSD. V.5, n.1, p. 94-106, 2019.

LORA, E. E. S., Andrade, R. V., Aradas, M. E. **Geração elétrica em pequena escala a partir da gaseificação de biomassa**. In: **Encontro de Energia do Meio Rural**, 5, 2004, Campinas, SP. Anais...Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script>>

MACHADO, F. H. G. **Sistema de arrefecimento de motores automotivos a combustão interna**. Trabalho de conclusão de curso. Centro Universitário do Sul de Minas Gerais- UNIS. Varginha, 2015.

MACHADO, S. A. **Avaliação do potencial de produção de biodiesel a partir de gorduras animais no estado de Santa Catarina e estudos de conversão de esterificação química**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de Lorena. Universidade de São Paulo, Lorena, 2013.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. 6ª ed. Engebook. 2020.

MATEAZZO, A. S. **Ensino de conceitos básicos de termodinâmica utilizando motor de combustão interna**. Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2021.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 2): conversion technologies**. Bioresource technology, v. 83, n. 1, p. 47-54, 2002a.

MESQUITA, G.B., MENEZES, J. V. **Gaseificação de biomassa fecal humana: Análise do processo via aspen plus e estudo do gás de síntese como combustível em um motor de combustão interna**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica. Centro tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, 2017.

MEYER, W. et al. **Avaliação de operadores e técnicos de manutenção de máquinas agrícolas no setor canavieiro**. Multi-Science Journal, 1(3), 64-68. 2015.

MORAN, M. J., et. al. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Grupo Editorial Nacional, 7 ed., LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.

MOREIRA, L. F. et al. **Utilização do turbo compressor em motores de combustão interna e seus benefícios**. Centro Universitário de Barra Mansa, 2019.

NABBOU, K. DE O. **Estudo das ondas de pressão formadas na admissão de um motor de combustão interna com a presença de um ressonador**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017.

NEGRY, M. M. DE O. **Análise das variações em ciclos operacionais em um motor Otto em homogeneous charge compression ignition (HCCI)**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

NOGUEIRA, J. B. C. **Análise do aumento de eficiência dos motores de combustão interna sobrealimentados**. Projeto de pesquisa de Engenharia Mecânica. Centro Universitário do Sul de Minas-UNIS. Varginha, 2021.

NOGUEIRA, M. F. M., RENDEIRO, G. **Caracterização Energética da Biomassa Vegetal**. In: Ministério das Minas e Energia – MME. Combustão e Gaseificação de Biomassa Sólida – Soluções Energéticas para a Amazônia. 1º Edição, P. 52-63. Brasília, 2008.

ORGAN, A. **Stirling cycle engines: inner workings and design**. Chichester: Wiley, 2014.

PACAZZA, I. et al. **Máquinas térmicas a vapor**. V Feira de Ciências, Tecnologia, Arte e Cultura (FECITAC) do Instituto Federal Catarinense – Campus Concórdia, v. 05, n.1, 2022.

PAULA, M. DE O. **Estudo do desempenho de um motor a combustão interna utilizando sobrealimentação**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2022.

PAUTZ, E. R. **Estudo e projeto de um motor Stirling**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul – UNIJUI. Panambi, 2013.

PEREIRA, B. S. **Controle da mistura ar/combustível em um motor de combustão interna: sistema em malha fechada**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015.

RAMOS, I. L. da C., das DORES, J. T. R. **Análise de um motor aeronáutico: um estudo de caso de cliente da CEPROM**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de Taubaté, Taubaté, 2017.

RIBBENS, W. B. **Understanding Automotive Electronics** 5ª Ed. Woburn, Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 1998.

ROCHA, H. A., RODRIGUES, A. S., MENDES, T. **Aproveitamento energético a partir da gaseificação da casca e torta de mamona**. In: Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Diamantina-MG UFVJM, 2022.

SALOMÃO, T. R., JUNIOR, R. DE O., AMARANTE, M. DOS S. **A evolução do motor a combustão ciclo Otto**. Pesquisa e Ação v.4, n.1, p. 106-113, 2018.

SANTOS, A. L. et al. **Avaliação físico-química de óleo residual de castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) e sua conversão em biodiesel**. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer. V.11 n.22, p.3550. Goiânia, 2015.

SANTOS, V. P. **Análise termodinâmica de gás de síntese no processo de combustão em ciclo Otto**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2018.

SHIRAISHI, C. DE M. **Transformação de motor ciclo Otto originalmente carburado em injeção eletrônica**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade de Taubaté. Taubaté, 2018.

SILVA, J. DA S. DE A. et al. **Proposed implementation of protection systems against diesel engine failure (diesel engine runaway)**. Journal of Engineering Technology for Industrial Applications, ed.19, v.05. 2019.

TRISTÃO, G. DE. A., SUMIOSHI, S. S. **Eficiência energética em motores de combustão interna**. X Simpósio de Iniciação Científica, Didática e de Ações Sociais da FEI. São Bernardo do Campo, 2020.

URNS, S. R. **Introdução à combustão conceitos e aplicações**. 3ª ed. AMGH Editora Ltda. 2013.

VANE, L. F. **Desenvolvimento de método exergoeconômico-ambiental: Uso do biogás em motores de combustão interna**. Tese de doutorado. Universidade Estadual Paulista, 2016.

VARELLA, C. A. A. **Estimativa da potência dos motores de combustão interna**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). 2010.

XAVIER, B. H. **Aspectos termodinâmicos, ecológicos e econômicos de sistemas de cogeração com motores de combustão interna operando com gás natural, biogás e gás de síntese**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-SP, 2016.

ZIMMER, S., OCAMPO, C. **Analytical gradients for gravity assist trajectories using constant specific impulse engines**. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. Vol.28, n.4 2005.