



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



GUSTAVO HENRIQUE MOREIRA LEITE

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR A
PISTÃO LIVRE PARA CARROS HÍBRIDOS**

OURO PRETO - MG

2021

GUSTAVO HENRIQUE MOREIRA LEITE
gustavohenrique.mleite@gmail.com

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR A PISTÃO LIVRE PARA CARROS HÍBRIDOS

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

Professora orientadora: Dra. Elisângela Martins Leal

Professor coorientador: Dr. Diogo Antônio de Sousa

OURO PRETO – MG

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L533a Leite, Gustavo Henrique Moreira.
Análise de desempenho de um motor a pistão livre para carros híbridos. [manuscrito] / Gustavo Henrique Moreira Leite. - 2021.
61 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Elisângela Martins Leal.
Coorientador: Prof. Dr. Diogo Antônio De Souza.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Energia. 2. Desempenho. 3. Motores - Motor a pistão livre. I. Leal, Elisângela Martins. II. De Souza, Diogo Antônio. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gustavo Henrique Moreira Leite

Análise de Desempenho de um Motor a Pistão Livre para Carros Híbridos

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

Aprovada em 09 de dezembro de 2021

Membros da banca

Profª D.Sc. Elisângela Martins Leal - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. DSc. Diogo Antonio de Sousa - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. DSc. Edson Alves Figueira Junior - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. DSc. Gustavo Paulinelli Guimarães - Universidade Federal de Ouro Preto

Elisângela Martins Leal, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/12/2021



Documento assinado eletronicamente por **Elisangela Martins Leal, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/08/2023, às 12:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0570311** e o código CRC **1E6E7407**.

A Deus dedico mais esta etapa vencida,
e minha família, pelo apoio.

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora Elisângela, pelo incentivo e orientação neste trabalho.

Aos professores e amigos da engenharia mecânica por suas importantes contribuições para o meu desenvolvimento profissional.

Aos irmãos de república, em especial Garrafada e Branca de Neve pela sincera troca de experiências ao longo do curso.

Agradeço principalmente a minha família pelo apoio incondicional, minha esposa Brenda e minha filha Catarina.

*“Não importa o quanto você bate, mas sim o quanto
aguenta apanhar e continuar de pé. O quanto pode
suportar e seguir em frente. É assim que se ganha”.*

Rocky Balboa

RESUMO

LEITE, Gustavo Henrique Moreira. Análise de desempenho de um motor a pistão livre para carros híbridos. Monografia (curso de Engenharia Mecânica). Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 61 páginas. 2021.

Atualmente a sociedade tem investido em diversas pesquisas na busca de alternativas que além de serem menos poluentes possibilitam melhor desempenho para os motores veiculares e possivelmente apresentam uma nova opção de substituição para os motores tradicionais, movidos a combustão. Uma dessas alternativas é o objeto de estudo desse trabalho, o motor de pistão livre associado a um gerador linear (FPEG – *Free Piston Engine Generator*) cuja configuração se mostra como uma opção fora dos padrões convencionais. O estudo é realizado tendo em vista a grande necessidade de se procurar um motor que possibilite a maximização da potência desses dispositivos em detrimento da minimização de perdas, para que por fim haja um aproveitamento energético vantajoso e tecnicamente viável. A alternativa escolhida é considerada um mecanismo fora dos padrões convencionais de geração de energia elétrica. O objetivo geral desse trabalho é analisar o desempenho de um motor a pistão livre aplicado em carros híbridos, tendo como objetivos específicos realizar um estudo teórico do motor a pistão livre e suas particularidades em relação aos motores convencionais. Ademais, através dos dados alcançados pelas diferentes variáveis de entrada e indicadores foi possível a análise do desempenho de um motor a pistão livre. Os resultados alcançados foram similares quando comparados aos dados obtidos na literatura científica.

Palavras-chave: Energia, motor a pistão livre, carros híbridos, análise de desempenho

ABSTRACT

LEITE, Gustavo Henrique Moreira. Performance analysis of a free piston engine for hybrid cars. Monograph (Bachelor degree in Mechanical Engineering). School of Mining, Federal University of Ouro Preto. 61 pages. 2021.

Currently, the society has invested in several researches in search of alternatives that, in addition to being less polluting, enable better performance for vehicular engines and possibly shows a new replacement option for traditional combustion-powered engines. One of these alternatives is the object of study of this work, the free piston engine generator (FPEG) whose configuration is shown as an option outside of conventional standards. The study is carried out in the view of a great need to look for an engine that makes possible to maximize the power of these devices at the expense of minimizing losses, so that ultimately there is an advantageous and technically feasible energy use. The chosen alternative is considered a mechanism outside of conventional electricity generation standards. The general objective of this work is to analyze the performance of a free piston engine applied to hybrid cars, having as specific objectives to carry out a theoretical study of the free piston engine and its particularities in relation to conventional engines. Furthermore, through the data obtained by the different input variables and indicators, it was possible to analyze the performance of a free piston engine. The results achieved were similar when compared to data obtained in the scientific literature.

Keywords: *Energy, free piston engine, hybrid cars, performance analysis*

LISTA DE SIMBOLOS

A: área do cilindro [m^2]

A: área da superfície pistão [m^2]

AFR: *Air-Fuel Ratio* (Razão ar-combustível) [kg ar / kg combustível]

c: coeficiente de amortecimento [adimensional]

C_{mec} : Coeficiente de amortecimento mecânico [N/m.s]

C_{mag} : Coeficiente de amortecimento relativo a força eletromagnética [N/m.s]

C_{crit} : Amortecimento crítico do sistema dinâmico [N/m.s]

C_v : Calor específico a volume constante [kJ/kg.K]

C_p : Calor específico a pressão constante [kJ/kg.K]

D: diâmetro do cilindro [m]

F: Força de excitação [N]

F_0 : Magnitude da força de excitação [N]

F_{el} : Força de Resistência do gerador [N]

F_e : Força do gás do cilindro esquerdo [N]

F_d : força do gás do cilindro direito [N]

k : Constante da mola ou rigidez [N/m]

K_t : Coeficiente de abertura do acelerador [adimensional]

k_v : Coeficiente da força de carga [adimensional]

L_c : comprimento da câmara de combustão [m]

L_s : Comprimento do curso do pistão [m]

m : massa [kg]

m_{ar} : massa de ar [kg]

m_{ar0} : massa de ar em aceleração total [kg]

m_{comb} : massa de combustível na mistura [kg]

p : pressão de gás do cilindro [Pa]

p_0 : pressão ambiente [Pa]

p_{cm} : pressão devido a liberação de calor [Pa]

p_{cp} : pressão do cilindro devido a mudança de volume [Pa]

P_{ot} : potência [W]

$P_{ot\ mec}$: potência mecânica [W]

$P_{ot\ ele}$: potência elétrica [W]

Q_{in} : Calor liberado do processo de combustão [J]

Q_{LHV} : Calor proveniente da energia química do combustível [J/kg]

RC: Razão de compressão [adimensional]

T_{mec} : Trabalho mecânico [J]

T_{ele} : Trabalho elétrico [J]

V : Volume do cilindro [m³]

V_c : Volume da câmara de combustão [m³]

V_d : Volume da câmara direita [m³]

V_e : Volume da câmara esquerda [m³]

V_o : Volume máximo do cilindro [m³]

W : trabalho de saída [J]

x : deslocamento do pistão [m]

Δp_{cm} : Variação de pressão no processo de liberação de calor [Pa]

ΔT : Aumento de temperatura [K]

ΔU : Diferença de energia interna [J]

η : eficiência de combustão [adimensional]

σ : função unitária de passo [adimensional]

ω_n : frequência natural angular [Hz]

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Poder Calorífico de alguns combustíveis	8
Tabela 2: Temperatura de autoignição de alguns combustíveis.	14
Tabela 3: Analogia entre um sistema amortecedor-massa-mola e um sistema FPEG	27
Tabela 4: Variáveis e indicadores	42
Tabela 5: Especificações do protótipo	45
Tabela 6: Variáveis de entrada	46
Tabela 7: Pressão, temperatura e volume nos pontos 1, 2, 3 e 4 do ciclo do motor a gasolina	51
Tabela 8: Desempenho termodinâmico FPEG operando a Gasolina	51
Tabela 9: Pressão, temperatura e volume nos pontos 1, 2, 3 e 4 do ciclo FPEG operando a Etanol.	52
Tabela 10: Desempenho termodinâmico FPEG operando a Etanol	53
Tabela 11: Variação de desempenho do FPEG de acordo com a temperatura e pressão iniciais	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sequência de operação do motor de pistão livre	11
Figura 2: Motor de ignição espontânea.	13
Figura 3: Formas de transferência de calor	15
Figura 4: Comparação entre os motores: a) Motor a pistão livre b) Motor alternativo convencional	18
Figura 5: Características essenciais de um motor a pistão livre	18
Figura 6: Diagrama esquemático do motor a pistão livre único	21
Figura 7: Diagrama esquemático do motor a pistão livre oposto com mecanismo de sincronização	21
Figura 8: Motor de pistão duplo	22
Figura 9: Esquema de um motor a pistão livre de alternador linear com duas câmaras de combustão	23
Figura 10: Motogerador a pistão livre	24
Figura 11: Esquema de equação dinâmica derivada da segunda Lei de Newton	25
Figura 12: Ilustração análoga do sistema de vibração forçada	26
Figura 13: Ciclo ideal de operação do FPGE	29
Figura 14: Repartição da oferta interna de energia no Brasil em 2016	36
Figura 15: Oxidação lenta e autoignição para uma mistura de n-heptano/ar	37
Figura 16: Diagrama P-V e T-S do ciclo Otto	39
Figura 17: Fluxograma de desenvolvimento do trabalho	41
Figura 18: Esquema mostrando as partes do protótipo do FPEG desenvolvido pela universidade de New Castle.	44
Figura 19: Deslocamento em função do tempo	46
Figura 20: Deslocamento por tempo do protótipo e modelo analisado por Jia et al (2016)	47
Figura 21: Deslocamento em função da velocidade FPEG operando com gasolina	48

Figura 22: Velocidade em função do tempo FPEG operando com gasolina	49
Figura 23: Pressão em função do volume para o FPEG a gasolina	50
Figura 24: Temperatura em função da entropia para o FPEG a gasolina	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Formulação do Problema	1
1.2	Justificativa	4
1.3	Objetivos	5
1.3.1	Geral	5
1.3.2	Específicos	5
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Energia	6
2.1.1.	Transformação de energia mecânica em elétrica em motor de pistão livre	9
2.2	Motor de combustão interna (MCI)	11
2.3	Veículos Elétricos Híbridos	15
2.4	Motor a pistão livre	16
2.4.1	Princípio de funcionamento e dinâmica do processo	17
2.4.2	Principais modelos de motor a pistão livre	20
2.5	Características de funcionamento do motor a pistão livre	23
2.5.1.	Modelo dinâmico linear	25
2.5.2.	Ciclo termodinâmico	28
2.5.3.	Processo de liberação de calor de volume constante	30
2.5.4.	Aproximação linear da pressão nos cilindros	32
2.6	Combustível	35
2.6.1	Rendimento da combustão	37
2.6.2	Rendimento Teórico	38
3	METODOLOGIA	40
3.1	Tipos de pesquisa	40
3.2	Materiais e Métodos	41
3.3	Variáveis e indicadores	42
3.4	Instrumentos e Coleta de dados	43
3.5	Tabulação dos Dados	43
3.6	Considerações Finais	43

4	RESULTADOS	44
4.1	Validação dos dados	45
4.2	Desempenho do FPEG operando a gasolina	48
4.3	Análise termodinâmica FPEG operando a etanol	52
4.3.1	Variação da pressão e temperatura de entrada	54
5	CONCLUSÃO	56
5.1	Conclusão	56
5.2	Recomendações	56

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo será apresentada uma abordagem teórica sobre o motor a pistão livre e análise de seu desempenho. Sendo assim, a finalidade do primeiro capítulo está vinculada na apresentação do problema, os motivos de sua origem, justificativa para realização, os objetivos e estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

Energia, em grego, tem significado de “trabalho” (do grego *enérgeia* e do latim energia) e, primeiramente, foi usado a fim de mencionar muitos dos fenômenos elucidados através dos termos: “vis viva” (ou “força viva”) e “calórico”. O termo energia surgiu pela primeira vez em 1807, recomendada pelo médico e físico inglês Thomas Young. A opção de Young pelo termo energia está diretamente relacionada com o entendimento que ele tinha de que a energia corrobora com a capacidade de um corpo realizar algum tipo de trabalho mecânico (WILSON, 1968).

Segundo Çengel & Boles (2007), máquinas térmicas são dispositivos que convertem calor em trabalho mecânico. Essa conversão pode advir de diferentes fontes: energia atômica, combustão, energia elétrica, entre muitas outras alternativas.

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis (ANP, 2019) o petróleo é um material fóssil, oleoso e inflamável, de elevado valor energético, com odor típico e sua tonalidade pode ir do incolor até o preto. Considerando ser uma matéria de alto valor energético e por ser uma fonte de combustível não renovável, a substância se tornou um produto estratégico para o desenvolvimento das sociedades ao redor do mundo.

De acordo com a Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica (PNM 2021) o registro de veículos elétricos leves de passageiros e comerciais em 2021 foi três vezes maior, na comparação com 2018, passando de 3.418 para 11.205 unidades.

Segundo a Aneel (2021) países que têm reservas de petróleo exercem controle sobre elas, além da estrutura para o seu refino, possuem grande importância geopolítica, além do aumento da participação no comércio internacional, tanto por meio da exportação direta do petróleo quanto de seus derivados. Tendo em vista ser a substância fóssil mais explorada, em razão destes adventos o petróleo também foi responsável por suscitar consecutivas guerras e crises internacionais ao longo do século XX.

É evidente a preocupação com o manejo dos recursos minerais e ambientais, e os efeitos da ação do homem sobre o meio ambiente natural. Há ainda uma preocupação maior com efeitos que os derivados de petróleo representam para a modernidade, sobretudo os combustíveis fósseis. Devido a isso, diversas são as determinações dos órgãos governamentais com relação ao nível de poluentes lançados na atmosfera, essas medidas visam reduzir os fenômenos ambientais a exemplo do aquecimento global. Ademais, há explicitamente uma inquietude com relação à economia do país. Todas essas premissas fomentam a busca por alternativas mais limpas e mais eficientes quanto aos modelos de motores dados como tradicionais no mercado o qual usam combustíveis fósseis para seu funcionamento.

Esse clima de dependência dos derivados de petróleo cria uma circunstância de fragilidade, pois estes recursos têm disponibilidade restrita e existem em regiões específicas, causando instabilidade nos preços e possíveis conflitos internacionais (EHSANI, *et al.*, 2005).

De acordo com Souza (2010, p.2):

“De forma geral, inúmeras configurações possibilitam a plurimotorização veicular, com fontes de energia convencionais e alternativas combinadas, de forma a maximizar o desempenho e minimizar o consumo e o impacto ambiental”.

Diante desse cenário, os derivados do petróleo, a exemplo da gasolina e do diesel, começaram a ser usados como principal combustível para o setor de transporte, diante disso a substância passou a ser a principal fonte da matriz energética mundial (ANEEL,2008). Para exemplificar seu patamar no país, o petróleo é a fonte energética mais consumida, girando em torno de aproximadamente 120 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), seguida pela eletricidade, com pouco mais de 40 milhões de toneladas.

Ponderando sobre essa dependência do petróleo e capacidade que a tecnologia tem de se desenvolver, o homem corre em busca de novas criações que o permitam e o ajudem em sua vida diária. É importante salientar que novos conceitos como a economia e o meio ambiente brotaram em prol da modernidade e são indispensáveis para a inspiração na criação dessas novas invenções e que precisam se adequar a esse movimento moderno e ao mercado consumidor. É a partir disso que a indústria automobilística, que cresce a cada instante, tende a “investir um maior montante de capital em suas áreas de pesquisa e desenvolvimento em busca de técnicas e ferramentas que permitam a criação de componentes mecânicos que apresentem ótimo desempenho e baixo consumo de combustíveis, fato que em produções de grande escala acarretaria em um menor impacto ambiental” (Bosso, 2013, p.1).

Dentro dessa perspectiva, a tecnologia apresentada no sistema híbrido em automóveis vem se destacando a nível mundial. Essa possibilidade versa sobre utilização de duas fontes de energia, o motor de combustão interna, um motor elétrico e um banco de baterias, que permitem um uso menor de combustível para mover o veículo, conseqüentemente diminuindo a emissão de gases poluentes lançados na atmosfera. Essa tecnologia também utiliza freios regenerativos, que recarregam as baterias quando são utilizados, aumentando assim a autonomia do veículo.

Dentre as opções de motores alternativos, ganha-se destaque o motor a pistão livre que consiste fundamentalmente em um motor à combustão destinado a gerar eletricidade para alimentar carros híbridos quando as baterias ficam descarregadas. Esse tipo de motor, o motor a pistão livre, vem sendo estudado ao redor do mundo em razão de suas vantagens em termos de alta eficiência e baixa emissão de gases poluentes. Ademais, esse sistema é capaz de aumentar a autonomia de veículos elétricos e híbridos, e são colaboradores do meio ambiente, diminuindo assim as razões de gás carbônico em 16 vezes se comparadas aos veículos convencionais (EBERLE; HELMOLT, 2010).

A associação do gerador linear ao motor a pistão livre traz certa autonomia para o veículo, pois se mostra um sistema vibratório que possui certo grau de liberdade, obtendo uma máquina mais eficiente na conversão da energia química do combustível em energia elétrica (ZOU et al., 2017). Uma das grandes vantagens desse conjunto é que com um pistão livre, o motor é muito mais simples, dispensando biela, virabrequim, comandos de válvulas e todos os outros componentes grandes e pesados dos motores tradicionais. Além disso, possivelmente o motor a pistão livre aceita qualquer tipo de combustível, seja ele líquido ou gasoso, ou seja, possivelmente aceita uma alternativa mais benéfica para a economia e para o meio ambiente. Levando em consideração as premissas apresentadas, há que se perguntar:

Qual a influência dos parâmetros de operação no desempenho de um motor a pistão livre em carros híbridos?

1.2 Justificativa

O estudo e controle das transformações energéticas tem vital importância para a evolução da tecnologia. Recentemente, a humanidade tem mostrado maior preocupação com as fontes energéticas. Apesar disso, a maior parte da energia gasta no mundo moderno é ainda

proveniente de fontes não renováveis, tendo o petróleo como fonte principal. A gasolina e o óleo diesel são os principais tipos de fontes derivadas usadas em motores automotivos. Considerando o aumento da frota de veículos nas últimas décadas, pode se dizer que o consumo de petróleo e de seus derivados é diretamente proporcional à demanda do setor automobilístico.

A busca pelo progresso a cada dia que passa só aumenta, e ela deve vir acompanhada da preocupação de não prejudicar o meio ambiente ou prejudicar o mínimo possível. No entanto, esse cenário de crescimento exacerbado da frota permite dizer que as empresas apenas visam maximizar os lucros sem pensar nas consequências a longo prazo, o que compromete a própria existência de todo o complexo na face da terra. Portanto, é importante colocar em prática a questão do desenvolvimento sustentável que muito se fala e nada se vive, além de pensar em alternativas para a questão econômica que envolve o cliente final consumidor. É através desse desenvolvimento sustentável que serão criadas alternativas harmônicas para que haja um futuro adequado para as próximas gerações.

Considerando o atual cenário, o uso do motor a pistão livre em veículos híbridos é uma alternativa para o futuro, já que uma das características desse tipo de motor é ser mais leve, eficiente, com simplicidade mecânica, pois possui comunicação direta entre o pistão e o gerador elétrico. Em outras palavras, não há componentes mecânicos interligando as partes do motor, o que propicia uma vida útil operacional do motor sem necessidade de lubrificação. Além disso, seu sistema é silencioso devido aos movimentos de forças e vibrações serem axiais ao motor. Possui compressão variável permitindo assim otimizar o processo de combustão, o que possibilita o uso de diversos tipos de combustíveis. A possibilidade de minimização da perda de energia e maximização da potência através desse tipo de motor torna o estudo importante para um aproveitamento energético eficiente e viável.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar o desempenho de um motor a pistão livre aplicado a carros híbridos.

1.3.2 Específicos

- Realizar estudo teórico do motor a pistão livre e suas particularidades;

- Descrever a metodologia adotada, apontar as variáveis e os indicadores do estudo e apresentar a instrumentação de coleta e tabulação dos dados obtidos;
- Analisar o desempenho de um motor a pistão livre operando com etanol como combustível;
- Concluir e recomendar trabalhos futuros.

1.4 Estrutura do Trabalho

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

No primeiro capítulo é apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e os objetivos geral e específicos. O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito do funcionamento e da análise de desempenho de um motor a pistão livre aplicado a carros híbridos e quais suas implicações. Também são relatados tipos diferentes de motores híbridos. O terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas utilizadas para a coleta de dados que são partes essenciais na obtenção dos resultados. No quarto capítulo são relatadas as discussões e resultados encontrados a partir da coleta de dados. Além disso, é proposto o projeto de um mecanismo que permita a utilização e a aplicabilidade do motor a pistão livre. O quinto capítulo encerra o trabalho com as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Além de apresentar uma abordagem teórica a respeito dos carros híbridos, esse capítulo também contribui na construção teórica acerca do tema, na comparação e validação de resultados encontrados, especificamente o uso do pistão livre para automóveis, junto com seus principais componentes e por fim os conceitos fundamentais de transferência de energia. Sendo assim, a finalidade do segundo capítulo está vinculada no embasamento teórico para todo o trabalho.

2.1 Energia

Segundo Halliday (2008) energia é um número que se associa a um sistema de um ou mais objetos. Se uma força muda um dos objetos fazendo-o entrar em movimento, esse algarismo é que descreve a energia do sistema que varia. Ainda segundo o autor, esse processo se baseia em uma propriedade interessante de nosso universo: a energia pode ser transformada de uma forma para outra, e transferida de um objeto para o outro, mas a quantidade total é sempre a mesma, ou seja, a energia é sempre conservada. Até os dias atuais não se encontrou exceção para a lei de conservação da energia.

De acordo com Tipler (1976, p. 399): “A termodinâmica é o estudo dos processos de transferência de energia entre corpos macroscópicos e que envolvem a temperatura”. Corroborando com a definição Çengel e Boles (2007, p.2) em seu livro nos diz, de modo sucinto que “A termodinâmica pode ser definida como a ciência da energia”. Apesar de que toda pessoa tenha uma vaga ideia do que seja energia, teoricamente é difícil estabelecer um significado adequado para essa definição. Os autores ainda dizem que “a energia pode ser entendida como a capacidade de causar alterações” (ÇENGEL e BOLES, 2007, p.2).

Çengel e Boles (2007) explanam em sua obra sobre o princípio de conservação de energia, que se considera como uma das leis mais fundamentais da natureza. Esse princípio que durante uma interação, a energia pode mudar de uma forma para outra, mas que a quantidade total permanece constante. Ou seja, a energia não pode ser criada ou destruída, mas sim transformada. A alteração no conteúdo de energia de um corpo, ou de qualquer outro sistema, é a diferença entre a entrada e a saída de energia, e o balanço de energia é expresso como:

$$E_e - E_s = \Delta E \quad (1)$$

Dentro dessa perspectiva, os autores mencionam que a lei zero da termodinâmica declara que se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, eles também estão em equilíbrio térmico entre si. Tal fato não pode ser concluído a partir das outras leis da termodinâmica, e serve como base para a validade da medição da temperatura. Ao substituir o terceiro corpo por um termômetro, a lei zero pode ser reescrita como “dois corpos estão em equilíbrio térmico se ambos tiverem a mesma medida de temperatura, mesmo que não estejam em contato”.

Çengel e Boles (2007, p.2) falam ainda que,

“A primeira lei da termodinâmica é apenas uma expressão do princípio de conservação de energia, e diz que a energia é uma propriedade termodinâmica. A Segunda Lei da Termodinâmica diz que a energia tem qualidade, assim como quantidade, e que os processos reais ocorrem na direção da diminuição da qualidade da energia”.

Sonntag *et al.* (1997) fala que em um sistema passando por mudança de estado, a energia pode cruzar a fronteira na forma de calor ou trabalho (W). A variação líquida de energia do sistema (Q) será igual a transferência líquida de energia que cruza a fronteira do sistema. A energia do sistema pode variar por qualquer uma das três maneiras associadas a massa (m): variação da energia interna (u), da energia cinética (PV), da energia potencial ($\frac{V^2}{2}$) ou da energia potencial gravitacional (gz). Observações análogas a essas conduziram a formulação da Primeira Lei da termodinâmica para uma mudança de estado num sistema, que pode ser escrita da seguinte forma:

$$Q = W + m(u + PV + \frac{V^2}{2} + gz) \quad (2)$$

Posteriormente Sampaio e Calçada (2005) dizem que a segunda lei da termodinâmica tem um caráter estatístico, estabelecendo que os processos naturais apresentam um sentido preferencial de ocorrência, sempre tendendo o sistema para uma condição de equilíbrio. Na verdade, a segunda lei não estabelece, entre duas transformações possíveis, qual a que seguramente acontece, mas sim a que tem maior possibilidade de ocorrer.

Ainda de acordo Sampaio e Calçada (2005), vários enunciados foram propostos para a segunda lei da termodinâmica. Entre os cientistas que propuseram tais enunciados pode-se citar Kelvin, Clausius, Plank, Ostwald e Carnot. Uma conclusão geral a respeito da Segunda

Lei da Termodinâmica e que serve de base para estudar as máquinas térmicas pode ser apresentada como: é impossível a construção de qualquer dispositivo que, operando ciclicamente, tenha como único efeito retirar calor de um sistema e convertê-lo inteiramente em energia mecânica (trabalho).

Brunetti (2013) descreve as máquinas térmicas como sistemas mecânicos que permitem transformar calor em trabalho. E que existem várias fontes que podem possibilitar a obtenção deste calor, dentre elas estão a combustão, energia elétrica, energia atômica, etc.

Dentro desse cenário Martins (2006) nos diz que a quantidade de energia química disponível no combustível chama-se poder calorífico. Como os motores estão limitados pelo volume da combinação, a melhor indicação para o poder calorífico da mistura é em base volumétrica, relativamente à mistura ar-combustível. É possível observar na Tabela 1: o poder calorífico por litro.

Tabela 1: Poder Calorífico de alguns combustíveis

Combustível	Energia disponível (MJ/L)
Gasóleo	36
Gasolina	33
GPL	25
LNG (a-162°C)	22
Etanol	21
Metanol	16
CNG (300 bar)	12
H ₂ (líq. a -235°C)	8,5
H ₂ (comp. a 250bar)	2,5

Fonte: Martins, 2006

Martins (2006) ainda menciona que os combustíveis utilizados em veículos carecem de carregar certa quantidade de energia por volume. Dentre os principais combustíveis usados, o gasóleo por causa da sua alta massa específica, é o que exhibe maior poder calorífico por volume (litro), seguido da gasolina, assim como pode ser observado na Tabela 1.

2.1.1. Transformação de energia mecânica em elétrica em motor de pistão livre

De acordo com Ferraz Netto (2011), todo dispositivo que tem como desígnio a produção de energia elétrica por meio da energia mecânica é máquina geradora de energia elétrica. O funcionamento tem por alicerce fenômenos eletrostáticos, ou ainda a indução eletromagnética. Em indústrias, os projetos que geram a energia elétrica derivam de geradores mecânicos, sendo estes os principais utilizados e cujo princípio é a indução eletromagnética, ou seja, os geradores mecânicos de corrente alternada ou os chamados alternadores. Em contrapartida, existem os geradores mecânicos de corrente contínua podem ser nomeados como dínamos.

O funcionamento dos motores elétricos baseia-se na interação entre campos eletromagnéticos, embora há motores com base em diferentes fenômenos eletromecânicos, conhecidas como forças eletrostáticas (FRANCHI, 2008). Apoiando o suposto, Ferraz Netto (2011) explica que em máquinas geradoras de energia elétrica, tanto no motor quanto no gerador, é possível realizar a distinção de duas partes principais: o estator, que consiste em um conjunto de componentes que são unidos de forma rígida à carcaça e tem por função conduzir o fluxo magnético, e também o rotor, girando em torno de um eixo que se ampara em mancais fixados na carcaça, responsável por produzir o campo magnético. Nos dínamos há uma indução em que o estator induz o rotor, produzindo o processo inverso nos alternadores. Assim, a corrente induzida causa a produção de um campo magnético que tem a habilidade de exercer forças contrárias à rotação conforme afirma a Lei de Lenz.

Brito (2014) afirma que o princípio basilar que permeia os motores eletromagnéticos é uma força mecânica presente em todo o fio que direciona a corrente elétrica que está imersa no interior do campo magnético. Essa é a força proposta pela denominada Lei da Força de Lorentz, sendo esta perpendicular tanto ao fio quanto ao campo magnético. Segundo Araújo (2015, p.1) “a força de Lorentz é a força exercida numa partícula carregada devido à existência de um campo eletromagnético”. Matematicamente, a força de Lorentz (F) é dada pela expressão:

$$F = |q|vB\text{sen}\theta \quad (3)$$

Em que: q é o módulo da carga elétrica, v é a velocidade da carga, B é o campo magnético e θ é o ângulo entre a direção da velocidade da carga e a direção do campo magnético.

Quanto ao rotor, ele é o elemento que continua girando no interior do motor ou gerador. Isto acontece porque os fios e o campo magnético estão organizados de tal forma que um torque possa ser desenvolvido sobre a linha central do rotor. Em sua maior parte, os motores magnéticos têm caráter giratório, conquanto também existam os tipos lineares. O interior do motor giratório é o próprio rotor. Já o estator é a parte estacionária, sendo então a constituição do motor por eletroímãs dispostos em ranhuras do material ferromagnético que compõem o rotor (BRITO, 2014). Os motores de geradores de energia elétrica funcionam a partir da queima de combustível, da mesma forma que o motor de um carro ou caminhão fazem. Acoplados a um alternador, eles operam transformando a energia mecânica em energia elétrica (GALDINO, 2011).

No motor a pistão livre é imprescindível que a carga integrada ao equipamento seja compatível com o dispositivo. Entende-se como carga o mecanismo que é acoplado à máquina linear para que esse conjunto se torne um único equipamento. A carga transforma a energia mecânica provida pelos dispositivos lineares em trabalho útil que irá realizar determinada função. Segundo Mikalsen e Roskilly (2007), as cargas que são unidas aos motores de pistão livres precisam ser capazes de interagir com o pistão de modo dinâmico, por meio de um balanço de força e a fim de não limitar a cinemática do mesmo. Ademais, os efeitos secundários devido a aceleração e a transferência de calor entre o pistão e o dispositivo de carga devem ser considerados. Assim, apenas específicos tipos de carga serão compatíveis com este tipo de máquina. Para que o sistema geral do motor seja eficiente, essas cargas precisam ser lineares e capazes de prover uma conversão de energia eficaz. Um dos desafios para o desenvolvimento do motor a pistão livre é permitir que a máquina linear tenha uma performance equivalente a fontes de energia rotativa, a exemplo dos motores de combustão interna e turbinas na geração de energia elétrica.

Em seu trabalho, Aichlmayr (2002) descreveu o desenvolvimento do motor a pistão livre segundo as transferências de energia que ocorrem durante seu funcionamento conforme pode ser visto na figura 1.

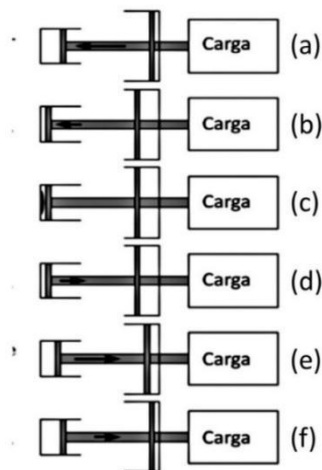


Figura 1: Sequência de operação do motor de pistão livre

Fonte: adaptado Aichlmayr (2002)

Assim, conforme a Figura 1 supõe-se que o movimento inicial do pistão seja da direita para a esquerda, comprimindo a mistura de gases, portanto, a energia é transferida do pistão para o fluido (a). Em seguida, a transferência de energia é completa quando o pistão atinge o ponto morto superior e neste momento sua velocidade é zero (b). Com o processo de combustão, energia é adicionada ao volume de controle (c). A energia térmica vinda da combustão é convertida em energia cinética. Logo o pistão se move da esquerda para a direita (d). Durante o processo de expansão, considera-se que uma parte da energia é absorvida pela carga e o remanescente é absorvido pelo dispositivo de rebote, aqui a dissipação de energia por atrito e calor é desconsiderada. No ponto morto inferior o pistão atinge a velocidade zero. Observa-se no ponto (e) que a transferência de energia está completa. Posteriormente, a energia contida no dispositivo de rebote é devolvida ao pistão, desta forma o pistão é impulsionado para esquerda e o ciclo se repete (f).

2.2 Motor de combustão interna (MCI)

Acredita-se que a criação do motor de combustão interna teve seu início com a invenção de armas de fogo, que apesar de não simular um motor alternativo, a explosão da pólvora transforma-se em trabalho (deslocamento do projétil). Todavia na realidade, as primeiras tentativas para realizar trabalho útil usando algum combustível, tiveram lugar na segunda metade do século XVII, usando a explosão de pólvora para movimentar um pistão dentro de um cilindro (MARTINS, 2016).

Segundo Martins (2016), nos primeiros motores de combustão interna os gases de combustão esfriavam após a queima, baixando a sua pressão e por conseguinte a descida do pistão fazia subir água ou carvão pela ação da pressão atmosférica. Assim foi descrita a ideia proposta por Christiaan Huygens em 1673, que se tornou a primitiva notícia divulgada sobre um motor. Destaca-se que havia um traçado de Leonardo da Vinci datado de 1508 em que este propôs “elevar um peso por meio de fogo”, com o mesmo princípio de funcionamento (aproveitando o vácuo resultante do arrefecimento dos gases). Nota-se que a eficiência destas máquinas chegava a 15%.

É notória a busca do homem ao longo dos anos pelo desenvolvimento de motores para melhor utilização da energia disponível na natureza, aumentar a eficiência do seu trabalho e das máquinas existentes e trazer, além de tudo, mais conforto e facilidades no dia-a-dia. Entretanto, nem todas as alternativas desenvolvidas desde a criação desses motores foram prósperas, mas, para Martins (2006), os motores de compressão prévia merecem destaque.

De acordo com Passos (2017), motores de combustão interna podem ser classificados quanto à forma de se obter trabalho mecânico em:

- **Motores alternativos:** quando o trabalho é obtido pelo movimento de vaivém de um pistão, transformado em rotação contínua por um sistema biela-manivela.
- **Motores rotativos:** quando o trabalho é obtido diretamente por um movimento de rotação.
- **Motores de impulso:** quando o trabalho é obtido pela força de reação dos gases expelidos em alta velocidade pelo motor.

Além da divisão das máquinas térmicas quanto a forma de se obter trabalho proposta por Passos (2017), Martins (2016) faz ainda uma classificação dos motores de combustão interna quanto a inúmeros outros fatores, alguns dos quais estarão listados a seguir.

- **Quanto ao ciclo de operação:** podem ser classificados como quatro tempos (ciclos de Otto, de Diesel, misto, de Miller, entre outros); dois tempos.
- **Quanto ao tipo de ignição do combustível:** podem ser classificados como de Ignição comandada (ou ignição por faísca) - gasolina; de Ignição não comandada (ou por compressão) - Diesel; ou de Ignição híbrida.
- **Quanto à colocação ou desenho das válvulas:** podem ser de válvulas laterais; válvulas à cabeça; ou válvulas rotativas.

- **Quanto ao combustível usado:** podem ser com gasolina; Gasóleo; Gás (gás natural ou GPL); Oxigenados (álcool, éter, éster, entre outros); Óleos pesados ("*thick fuel oil*"); "*Dual-fuel*" (dois combustíveis diferentes); Carvão (por exemplo emulsionado com água).
- **Quanto à preparação da mistura (gasolina):** Carburador; Injeção (na admissão); Injeção direta (na câmara de combustão).
- **Quanto ao arrefecimento:** Líquido; à ar.
- **Quanto à geometria dos cilindros:** Monocilindro; Cilindros em linha; Cilindros opostos; Pistões opostos; Cilindros em V, em W, em H, entre outros; Cilindros em estrela.

Ainda segundo o mesmo autor em seu outro trabalho, Martins (2002), todos estes pontos explicitam os motores, mas muitos outros poderiam ser explicitados, tais como a aplicação do motor, pois pode-se usá-los para tracionar veículos (carros, caminhões, ônibus), como também em aviões e barcos ou para produzir energia mecânica (ar comprimido, por exemplo) ou eletricidade.

De acordo com Brunetti (2012) os motores de ignição espontânea (MIE) funcionam da seguinte maneira, o pistão comprime somente ar até que o mesmo atinja uma temperatura satisfatoriamente elevada. Quando o pistão se aproxima do ponto morto superior, injeta-se o combustível, como pode ser visto na figura 2, que reage prontamente com o oxigênio presente no ar quente, sem a necessidade de uma faísca. A temperatura do ar necessária para que aconteça a reação espontânea do combustível denomina-se temperatura de autoignição (TAI).

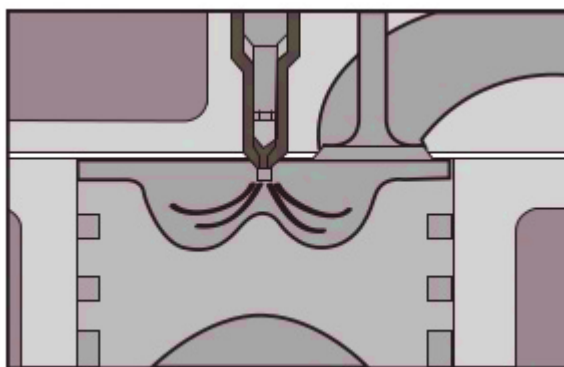


Figura 2: Motor de ignição espontânea.

Fonte: Adaptado Brunetti, 2002

Para fins de conhecimento e para ilustrar o suposto com relação à TAI seguem alguns valores típicos de temperatura de autoignição de alguns combustíveis que podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2: Temperatura de autoignição de alguns combustíveis.

Diesel	Etanol	Metanol	Gasolina E22
250°C	420°C	478°C	400°C

Fonte: Adaptado Brunetti, 2002

Pela Tabela 2 é possível inferir que a temperatura de autoignição do etanol é superior a do óleo Diesel, mas inferior à do metanol.

Ainda de acordo com Brunetti (2012), os motores de ignição por faísca (MIF) ou Otto, atuam da seguinte forma, a mistura combustível-ar é aceita, previamente dosada ou formada no interior dos cilindros quando há injeção direta de combustível (GDI - *gasoline direct injection*), e inflamada por uma faísca que acontece entre os eletrodos de uma vela. Já nos motores alternativos a dois tempos (2t) de ignição por faísca o ciclo completa-se com apenas dois cursos do pistão, correspondendo a uma única volta do eixo do motor. Os processos apontados no motor a quatro tempos são realizados da mesma maneira, entretanto, alguns deles se sobrepõem num mesmo curso (BRUNETTI, 2012).

Em um primeiro momento a mistura é comprimida pelo pistão dentro da câmara de combustão. Em seguida o mecanismo de ignição produz uma centelha elétrica nas velas inflamando a mistura o que causa uma explosão e conseqüentemente gera um deslocamento de massa empurrando o pistão para baixo, originando então força, torque e movimento rotativo. O processo é finalizado com a expulsão dos gases queimados para fora do motor (MENDONÇA et al, 2018).

Os gases advindos da combustão produzem elevadas temperaturas no interior da câmara de combustão promovendo a transferência de parte do calor gerado para as paredes dos cilindros e, conseqüentemente do cabeçote (BRUNETTI, 2012).

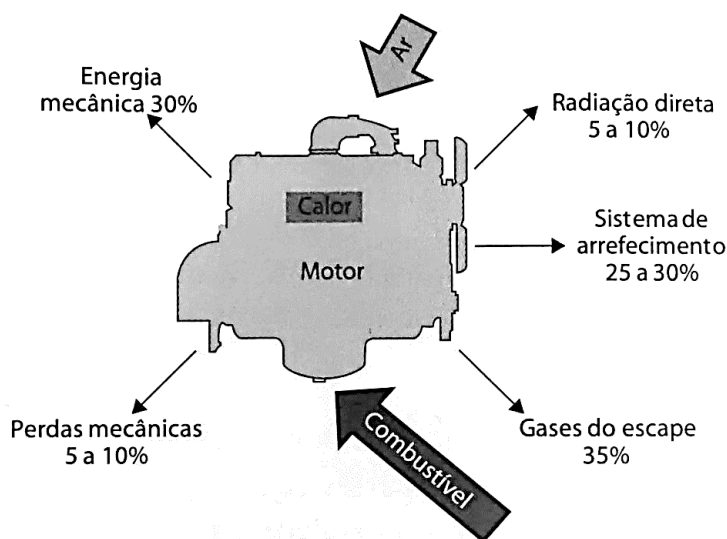


Figura 3: Formas de transferência de calor

Fonte: Adaptado Brunetti, 2012

Através da figura 3 é possível analisar as formas de transferência de calor em um motor de combustão interna. Observa-se que apenas 30% da energia produzida pelo motor se transforma em trabalho útil, 35% são expelidos pelos gases de exaustão e que de 25 a 30% deve ser retirada pelo sistema de arrefecimento, com função de manter os componentes do motor em temperaturas médias compatíveis com as características dos materiais constituintes.

2.3 Veículos Elétricos Híbridos

Os ditos veículos híbridos ou “carros verdes” é uma tecnologia recente, o que acarreta em ter um valor aquisitivo ainda elevado. Mas trazem consigo prerrogativas de menor emissão de poluentes e a promessa de uma melhor eficiência energética. Por isso muitas empresas atualmente vêm investindo nesse tipo de tecnologia. Eles não são somente utilizados em modelos de passeio, mas também em outros meios de transporte como ônibus, locomotivas e veículos fora de estrada. Alguns estudos estão sendo desenvolvidos para redução de custos nesses projetos e uma das possibilidades está concentrada justamente no uso do motor a pistão livre.

Veículos elétricos híbridos (VEH) são veículos nos quais duas ou mais fontes distintas de energia são empregadas no sistema de propulsão. A combinação mais comum é a utilização de motor de combustão interna em conjunto com um banco de baterias.

(REVOREDO, 2007). A compreensão a respeito destes veículos foi feita com a finalidade de unir as principais características dos veículos elétricos puros, tais como sua grande eficiência energética e a emissão nula de poluentes, com a principal atributo dos veículos convencionais que é a de possuir uma grande autonomia.

Os VEHs podem ser classificados de acordo com o seu fator de hibridização e a sua arquitetura.

Conforme Somà (2017), é importante citar que não existe uma classificação oficial para veículos híbridos. Mesmo assim, pode-se organizá-los quanto ao grau de hibridização (*HF - Hybridization Factor*), que seria a razão entre a potência máxima fornecida pelo motor elétrico ($P_{máx,e}$) pela potência fornecida pelo motor de combustão interna (P_{ICE}) somada a potência do motor elétrico (P_{el}).

$$HF = \frac{P_{máx,e}}{P_{el} + P_{ICE}} \quad (4)$$

Silva (2017) menciona que ao se relacionar o grau de hibridização com a tensão do sistema pode ser definida uma classificação para esses tipos de veículos. Nota-se que quanto maior é o fator de hibridização, mais acessórios são implementados no sistema híbrido e conseqüentemente a tensão do sistema também aumenta.

2.4 Motor a pistão livre

O motor a pistão livre nasceu através de Pescara em meados da década de 1930. A patente de Pescara apresenta um aparato contendo um motor a pistão livre de uma câmara de combustão e cuja função era produzir ar comprimido. Apesar da especificidade da patente, Pescara tomou como precaução expandir a proteção garantida pelo documento a muitas outras aplicações que empregassem semelhante tipo de força propulsiva (MIKALSEN; ROSKILLY, 2007; MIKALSEN, 2008).

Em um primeiro momento, os motores a pistão livre foram amplamente usados nos projetos de geração de ar comprimido e de gases direcionados para gerar energia elétrica em plantas industriais. Ademais, também são registrados o uso em equipamentos bélicos e no setor automotivo (ACHTEN, 1994; MIKALSEN; ROSKILLY, 2007).

No entanto, o uso dessas máquinas, segundo Mikalsen e Roskilly (2007) e Xiao, Li e Huang (2010), foi deixado de lado na década de 60, tendo em vista a superioridade adquirida pelos motores tradicionais, aqueles possuidores do mecanismo biela-manivela e cujo princípio de funcionamento é conduzido pelos ciclos Otto e Diesel. O uso foi preferido em função da estabilidade em seu funcionamento e na facilidade de partida.

Nos últimos anos essa realidade mudou em função de um futuro de escassez dos recursos minerais, principalmente o petróleo e das altas taxas de emissão de poluentes provenientes desses combustíveis. A partir daí houve um aumento de diversas empresas e grupos de pesquisa voltados para esse tipo de equipamento haja vista a necessidade de redução do uso de combustíveis fósseis e pela busca constante de redução de emissões proveniente da queima desses combustíveis e do aumento de eficiência. Diante disso Jia (2016) relata que o regresso a esse tipo de motor, a pistão livre, é devido ao conhecimento de que eles alcançam uma maior eficiência termomecânica, cerca de 40 a 50%, quando comparados aos motores tradicionais, cuja eficiência termomecânica é entre 30 e 40%. Em conjunto a isso, o retorno foi fomentado por precisar atender as restrições dos órgãos regulamentadores quanto a emissão de poluentes, além da disponibilidade de técnicas mais sofisticadas de controle e atuação de sistemas.

1.1.1 Princípio de funcionamento e dinâmica do processo

O motor a pistão livre possui a mesma classificação do motor de combustão interna, deste modo é descrito como uma máquina térmica que pode ser classificada como motor de combustão interna quanto ao comportamento do fluido ativo, e como motor alternativo quanto à forma de obtenção de trabalho mecânico (BRUNETTI, 2012). Apesar de possuir a mesma classificação, alguns autores definem esse tipo de motor baseados nas diferenças que ele apresenta com relação aos motores tradicionais.

O termo pistão livre é comumente utilizado para distinguir o motor linear de um motor de virabrequim rotativo. O pistão é considerado “livre”, pois seu movimento não é restringido pela posição do virabrequim, mas é determinado apenas pela interação entre as forças atuantes no volume de controle. A Figura 4 mostra uma comparação entre o motor alternativo convencional e o motor linear.

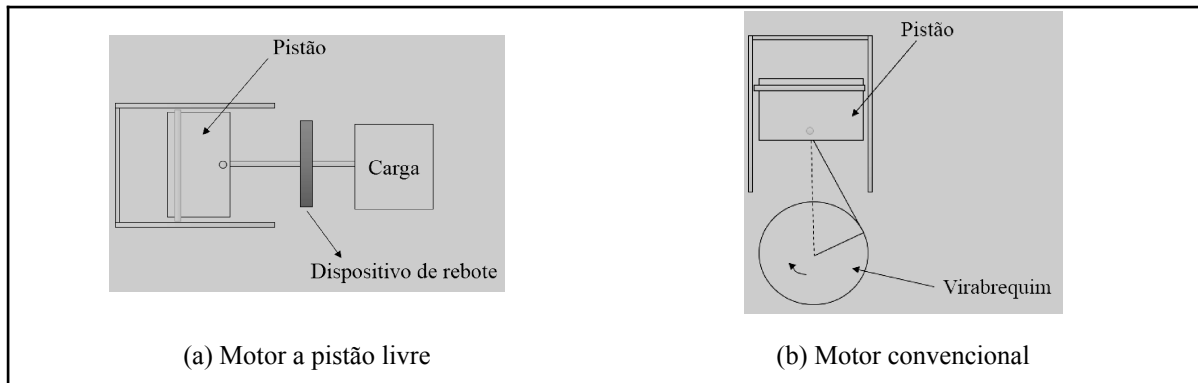


Figura 4: Comparação entre os motores: a) Motor a pistão livre b) Motor alternativo convencional

Fonte: adaptado Bento (2019)

Cabe ressaltar que ao se avaliar os princípios de funcionamento de um motor de combustão interna, é primordial uma compreensão abrangente da série de processos dinâmicos, físicos e químicos que ocorrem neste sistema. Já no caso do motor de pistão livre é possível utilizar-se dos conhecimentos já consolidados na área de motores de combustão interna, uma vez que os processos físicos e químicos a que o fluido ativo é submetido são os mesmos, havendo apenas diferenciação fundamental nos processos dinâmicos que abrangem a movimentação do pistão (MIKALSEN, 2008).

Dito isso Jia (2016) descreve os motores a pistão livre como motores lineares nos quais o uso da estrutura biela-manivela é removido e o pistão e outros elementos associados a ele, possui movimento livre e linear. Corroborando com Jia (2016) Mikalsen (2008), explica que os motores a pistão livre são motores lineares, não possuidores do mecanismo biela-manivela, assim sendo o movimento do pistão não é dado por este mecanismo e sim pela resultante de forças que atuam sobre o mesmo. Desse modo, o pistão é acoplado diretamente a um dispositivo de carga conforme pode ser visto na figura 5.

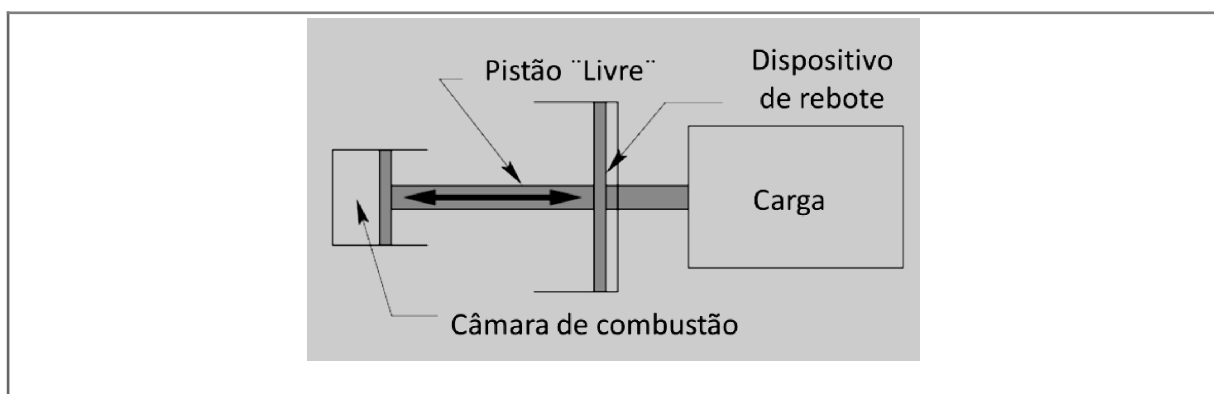


Figura 5: Características essenciais de um motor a pistão livre

Fonte: adaptado Aichlmayr (2002).

Ainda que os motores de pistão livre possam assumir várias configurações, conforme Aichlmayr (2002), todos eles apresentam os seguintes componentes: câmara de combustão, dispositivo de rebote ou ressalto e dispositivo de carga conforme mostra a figura 5.

Na câmara de combustão acontecem processos físicos e químicos que envolvem o fluido ativo. Quais processos ocorrem e a ordem deles irá depender do ciclo e regime a qual o motor foi arquitetado para trabalhar, sendo equivalentes aos existentes nos motores tradicionais.

O dispositivo de rebote, ou ressalto, é responsável primordialmente pelo armazenamento de parte da energia produzida durante o processo de expansão. Essa energia armazenada é utilizada para garantir que haja compressão suficiente para o próximo processo de combustão, assegurando assim, o funcionamento do equipamento em regime constante.

Além da energia entregue ao dispositivo de rebote, alguma parte da energia gerada pelo motor é convertida em calor, ruído, deformação, entre outros, pelas forças dissipadoras presentes, principalmente a força de atrito. A parte sobressalente é então absorvida pelo dispositivo designado de carga, cujo papel é converter essa energia cinética em outro tipo de energia ou diretamente em trabalho útil desejado. Os tipos de carga comumente utilizados no motor a pistão livre são os compressores de ar, as bombas hidráulicas e geradores elétricos lineares.

Assim, considerando-se o ponto de vista termodinâmico, as teorias empregadas aos motores térmicos convencionais são também aplicáveis aos motores a pistão livre. Logo, conclui-se que os mesmos processos observados em um motor convencional (admissão, compressão, expansão e escape), estão também presentes em um motor a pistão livre. Ressalta-se que na concepção do motor a pistão livre, a interação entre essas forças deve ser pensada de tal forma que o movimento do pistão seja delimitado, independente do regime de operação (MIKALSEN E ROSKILLY, 2007). O volante de inércia, característica presente nos motores convencionais e ausente no motor a pistão livre marca a diferença entre ambos motores. No primeiro caso, este mecanismo suaviza flutuações de energia cinética e estabiliza o funcionamento do motor, algo não presente no motor a pistão livre.

Todas essas características únicas, abordadas através do ponto de vista dinâmico, justificam o uso do termo para a criação de uma nova classe de motores. Essas características tais como o controle do movimento do pistão, da frequência de operação e a partida do motor

são alguns destes obstáculos, ao passo que a relação de compressão variável e a maior eficiência se mostraram como ganhos importantes para esses projetos.

Mikalsen *et al.* (2010) menciona que uma das fundamentais características e vantagens da utilização desses motores é a relação de compressão variável, que permite otimizar o processo de combustão, permitindo a utilização de diferentes combustíveis. Além disso, outras características importantes do motor a pistão livre compreendem principalmente a simplicidade mecânica e a flexibilidade operacional, além do comprimento de curso variável, a necessidade de controle ativo do movimento do pistão e as possíveis reduções nas perdas por atrito,

Portanto, a interação dessas forças deve ser organizada de forma a garantir a melhor performance do motor nos diferentes tipos de operação. Um dos maiores desafios nos dias atuais para o desenvolvimento de motores a pistão livre encontra-se no sistema de controle exato do movimento do pistão em conjunto com a carga do sistema (MIKALSEN *et al.*, 2010).

1.1.2 Principais modelos de motor a pistão livre

Os principais modelos de um motor a pistão livre são: (i) pistão único; (ii) pistão oposto e (iii) pistão duplo com duas câmaras de combustão. A seguir serão descritos cada um deles.

A) Motor a pistão livre com pistão único

Segundo Mikalsen e Roskilly (2007), o motor a pistão livre único consiste essencialmente em três partes: um cilindro de combustão, um dispositivo de carga e um dispositivo de ressalto para armazenar a energia necessária para comprimir a próxima carga do cilindro. A Figura 6 mostra o diagrama esquemático deste motor.

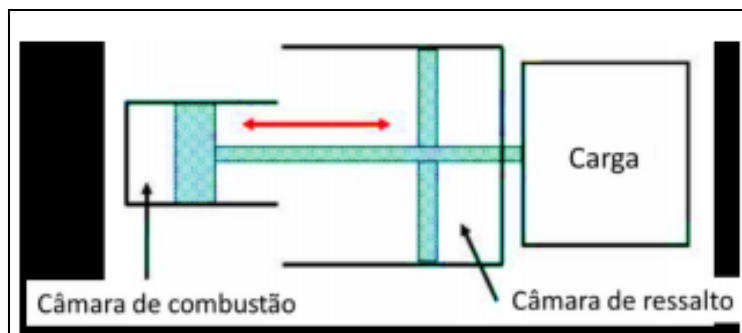


Figura 6: Diagrama esquemático do motor a pistão livre único

Fonte: adaptado Raide et al. (2017).

É possível observar na Figura 6 a disposição dos três principais componentes do motor a pistão livre. A câmara de combustão se encontra em uma das extremidades do motor e é interligada pelo pistão até a câmara de ressalto localizada na extremidade oposta, onde a energia é armazenada. O dispositivo de carga se encontra externo ao cilindro e é acionado através do movimento do pistão.

B) Motor a pistão livre de pistão oposto

A configuração deste tipo de motor consiste em duas unidades simples de pistão e uma câmara de combustão em comum. Cada pistão requer um dispositivo de rebote e o mecanismo de carga pode ser acoplado a um ou a ambos os pistões. A Figura 7 mostra o motor de pistão oposto com mecanismo de sincronização.

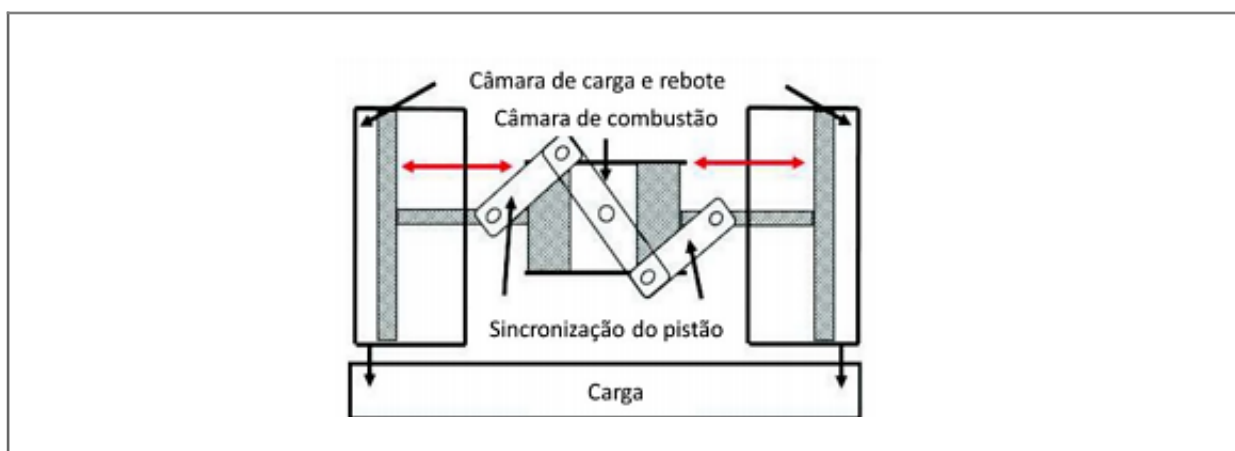


Figura 7: Diagrama esquemático do motor a pistão livre oposto com mecanismo de sincronização

Fonte: adaptado Raide et al. (2017).

Na Figura 7 pode-se visualizar o motor a pistão livre com pistões opostos e o dispositivo de sincronização. A câmara de combustão é central e as forças que se exercem sobre o dispositivo partem dessa parte central.

C) Motor a pistão livre de pistão duplo com duas câmaras de combustão

A arquitetura do motor de pistão duplo é baseada em uma única haste com dois pistões oscilantes entre duas câmaras de combustão opostas. Cada câmara de combustão atua como o

dispositivo de recuperação para a câmara oposta e o curso de expansão em um cilindro fornece a energia para a compressão do cilindro oposto, mostrado na Figura 8.

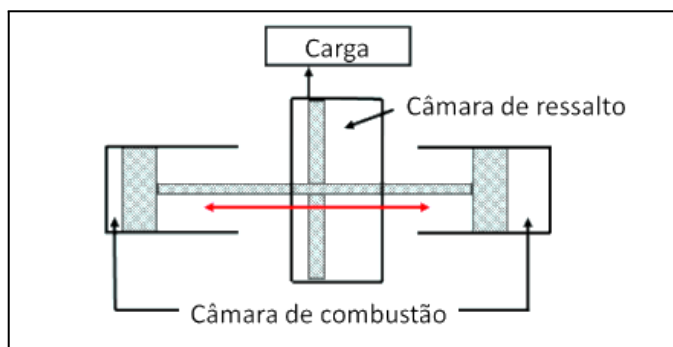


Figura 8: Motor de pistão duplo

Fonte: adaptado Raide et al. (2017).

A maior vantagem do projeto de pistão duplo é sua alta densidade de potência, uma vez que existem dois cursos de potência por ciclo, conforme Figura 8. Além disso, não há necessidade de armazenamento de energia para reverter o pistão. Assim, é mais fácil manter o movimento do pistão recíproco, ao contrário do único pistão e configurações de pistão oposto que requerem o uso de um dispositivo de rebote.

A categoria de pistão duplo é foco de grande parte das pesquisas recentes da tecnologia de motores de pistão livre. Vários projetos de pistão duplo foram propostos e alguns protótipos surgiram, ambos com saída de energia hidráulica e elétrica. Essa configuração possibilita a não utilização da câmara de retorno, pois o pistão oposto irá sempre fornecer trabalho para completar processo de compressão, tornando essa configuração mais compacta e com maior densidade de potência, resultando em maior relação de potência específica (MIKALSEN e ROSKILLY, 2007).

O alternador linear também pode ser usado como um motor linear durante a partida do motor e como um meio de controle do movimento do pistão em alta velocidade. O dispositivo de rebote é usado para neutralizar as forças de combustão e fornecer a força necessária para retornar o pistão do ponto morto inferior (PMI) para o ponto morto superior (PMS) após a expansão. O esquema da Figura 9 mostra os pistões e as câmaras de combustão dos lados esquerdo e direito, as portas usadas para a entrada, as válvulas usadas para exaustão, a biela entre os dois pistões, os ímãs permanentes sobre a haste, bem como as bobinas que são estacionárias.

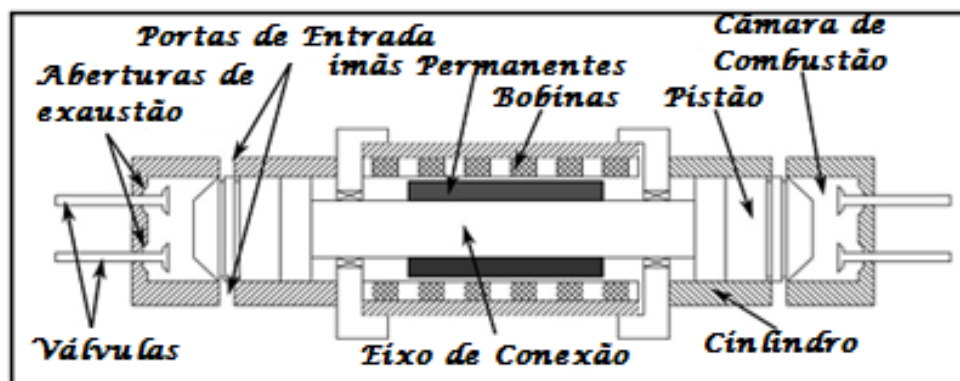


Figura 9: Esquema de um motor a pistão livre de alternador linear com duas câmaras de combustão
 Fonte: adaptado Aichlmayr (2002).

O diagrama da figura 9 permite observar os dois pistões nos respectivos cilindros, as válvulas de admissão localizadas nas extremidades das câmaras de combustão, direita e esquerda, as válvulas usadas para exaustão dispostas nas paredes do cilindro, a haste de ligação entre os dois pistões onde estão dispostos os ímãs permanentes, assim como as bobinas que são estacionárias localizadas ao redor dos ímãs permanentes.

1.2 Características de funcionamento do motor a pistão livre

Segundo Mikalsen e Roskilly (2007), uma das aplicações do motor a pistão livre é a geração de energia elétrica, por isso são chamados de motogerador a pistão livre (FPEG: *Free-Piston Engine Generator*), que integra um motor de combustão linear a um gerador elétrico linear em uma única unidade. O princípio de operação consiste na retirada de energia do combustível de forma similar a um motor de carro convencional. Entretanto, o movimento linear dos pistões é convertido em eletricidade diretamente. A configuração do FPEG consiste em duas câmaras de combustão, localizadas em extremidades opostas do motor e interligadas por uma haste, conforme representado na Figura 10.

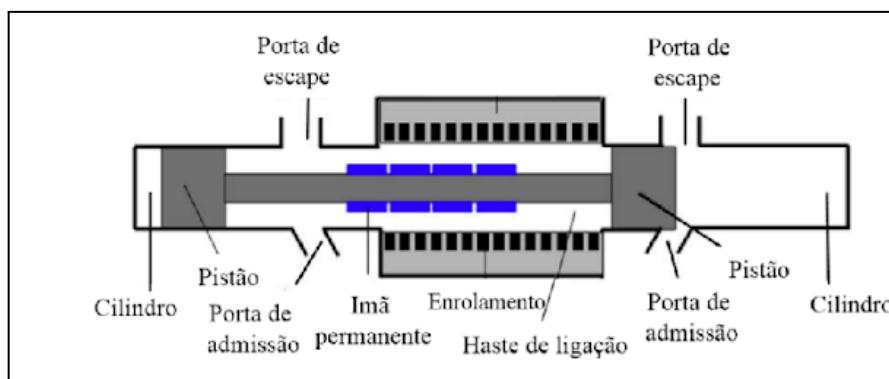


Figura 10: Motogerador a pistão livre

Fonte: adaptado Xiao et al (2010)

A combustão da mistura ar-combustível acontece de forma alternada em cada cilindro, empurrando o pistão para trás e para frente, conforme Figura 10. Na haste está acoplado o gerador linear de energia elétrica, que com o movimento linear da haste converte a energia mecânica em energia elétrica. A expansão dos gases em uma das câmaras proporciona a compressão na outra, promovendo assim o movimento linear do pistão. O gerador elétrico linear é composto por ímãs permanentes que são acoplados à haste do pistão. Assim, com o seu movimento linear e alternado, os ímãs se deslocam no interior de um conjunto de bobinas, gerando eletricidade.

O FPEG apresenta muitas vantagens, tais como redução do número de componentes, alta eficiência de conversão de energia, alta densidade de potência e resposta transitória rápida. Segundo Xiao *et al.* (2010), diversas pesquisas sobre a utilização e construção do FPEG vêm sendo abordadas. A maioria dos pesquisadores tende a adaptar modelos ideais e simplificados de motores convencionais para simular o gerador linear de pistão-livre. Um dos principais impulsionadores desses esforços de pesquisa é o potencial dos motores de pistão livre em fornecer um gerador de energia elétrica compacto e eficiente para veículos elétricos híbridos (HANIPAH *et al.*, 2015).

2.5.1. Modelo dinâmico linear

As partes principais do FPEG consistem em duas câmaras de combustão opostas e um motor elétrico linear. Um conjunto composto por uma haste acoplada a ímãs permanentes e pistões em cada extremidade está localizado entre as câmaras, e é a única parte móvel significativa do FPEG.

Como o pistão não é restringido pelo virabrequim, seu movimento é influenciado pelas forças de atuação do gás no cilindro, força do motor linear e força de atrito mecânico. Devido à eliminação do mecanismo biela-manivela, o atrito no virabrequim, nos rolamentos do eixo de comando, no mecanismo de válvula, engrenagens ou polias e correias que acionam a árvore de manivelas e os acessórios do motor são removidos. Como o movimento do pistão é linear, as forças laterais atuando sobre o pistão são mínimas em comparação com os motores convencionais, assim, o atrito entre os anéis do pistão e a parede do cilindro será significativamente reduzido. Como resultado, a perda por atrito no protótipo FPEG é menor do que em um motor alternativo e é desprezível em comparação com as forças de gás do cilindro. Por causa disso, a força de atrito é negligenciada neste trabalho.

Se a força de atrito for desprezada, a equação dinâmica do motor pode ser derivada da segunda lei de Newton e ilustrada na Figura 11.

$$m\ddot{x} = F_e + F_d + F_{el} \quad (5)$$

Em que (m) é a massa do conjunto móvel composto por pistão, haste e carga, (\ddot{x}) a aceleração do sistema móvel, (\vec{F}_e) a força dos gases no cilindro esquerdo, (\vec{F}_d) a força dos gases no cilindro direito e (\vec{F}_{el}) a força devido ao amortecimento viscoso e a força eletromagnética.

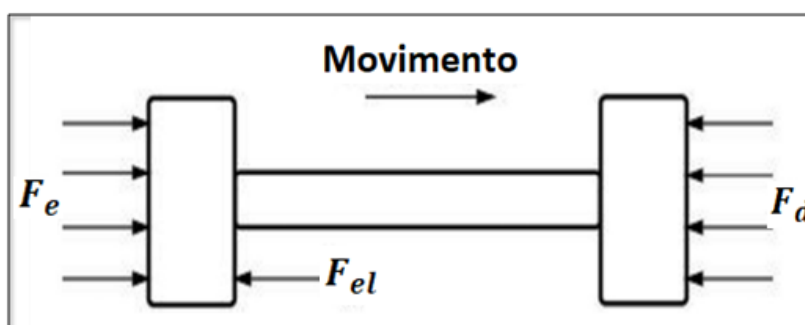


Figura 11: Esquema de equação dinâmica derivada da segunda Lei de Newton

Fonte: adaptado Jia et al, 2016

O diagrama de corpo livre da figura 11 exemplifica a ação das forças atuantes sob o conjunto composto pelos pistões e a haste de ligação, onde o sentido do movimento é definido pela resultante entre as forças.

A força do gás (F) pode ser medida usando a pressão do gás (P) e a área da superfície do pistão (A_B) que pode ser relacionado ao diâmetro do cilindro (D), conforme mostrado nas equações (6) e (7), respectivamente.

$$F = P \cdot A_B \quad (6)$$

$$A_B = \frac{\pi D^2}{4} \quad (7)$$

A representação esquemática do sistema massa mola é mostrada na figura 12 logo abaixo, onde é possível observar a força de excitação atuando sob a massa, que por sua vez está acoplada à mola e ao dispositivo de amortecimento, e por fim o deslocamento resultante da interação entre as forças.

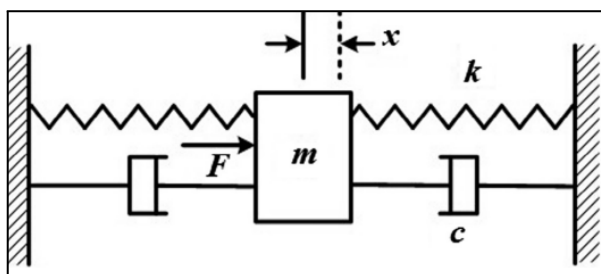


Figura 12: Ilustração análoga do sistema de vibração forçada

Fonte: adaptado de Jia et al., 2016

Em que: (m) é a massa móvel do sistema; (x) é o deslocamento do sistema; (F) é a força de excitação; (c) representa o dispositivo de amortecimento e (k) representa a mola.

Levando em conta que a área do pistão é fixada, a força resultante da combustão em cada cilindro varia de acordo com a pressão interior. Assim:

$$A_B = \frac{F_e}{p_e} = \frac{F_d}{p_d} \quad (8)$$

Em que: F_e é a força no cilindro esquerdo e F_d a força no cilindro direito, p_e é a pressão no cilindro esquerdo, p_d é a pressão no cilindro direito.

A variação da carga controlada pelo gerador elétrico linear é um dos principais mecanismos de controle de movimento do pistão, pois a força de carga exercida pelo gerador

elétrico é considerável, agindo diretamente no desempenho do FPEG. A força de carga exercida pelo gerador elétrico linear (\vec{F}_{el}) é função dos parâmetros de projeto, como materiais empregados na construção, da construção das bobinas (números de espiras), número de polos, e de variáveis externas ao gerador que podem variar com o tempo, como a velocidade do movimento relativo, da aceleração e da carga de resistência que pode ser controlada eletronicamente através do fluxo de corrente elétrica. Relacionando a força de amortecimento viscoso com a força eletromagnética temos:

$$\vec{F}_{el} = (C_{mag} + C_{mec}) \cdot \dot{x} \quad (9)$$

Em que C_{mag} é representa o amortecimento relativo a força eletromagnética, C_{mec} o amortecimento mecânico e \dot{x} representa a velocidade do conjunto.

Assim, reescrevendo a equação (5), onde x representa o deslocamento do conjunto.

$$m\ddot{x} = F_e(x) + F_d(x) + F_{el}(\dot{x}) \quad (10)$$

É possível linearizar a equação dinâmica do FPEG para um sistema de vibração forçada com amortecimento viscoso através da simplificação correta da força gerada pela pressão dos gases de combustão, assim como ilustrado na Figura 13.

É importante mencionar as características análogas de um sistema de vibração amortecedor-massa-mola e um sistema FPEG, conforme expresso na Tabela 3

Tabela 3: Analogia entre um sistema amortecedor-massa-mola e um sistema FPEG

Sistema Massa-mola amortecedor	Sistema FPEG
Movimento da massa, m	Massa do conjunto móvel (pistão, haste, carga)
Coeficiente de amortecimento, c	Carga exercida pelo gerador linear
Constante da mola, k	Pressão dos gases comprimidos
Força de excitação, F	Força de combustão dos gases

Fonte: adaptado Jia et al, 2016.

2.5.2. Ciclo termodinâmico

Apesar das diferenças mecânicas encontradas no funcionamento do motor a pistão livre, o ciclo termodinâmico continua operando de forma similar aos motores convencionais, sendo constituído por quatro processos termodinâmicos, são eles: (BRUNETTI, 2012)

- Processo de compressão adiabática, onde a compressão eleva a temperatura dos gases, entretanto insuficiente para provocar a inflamação.
- Processo de aquecimento isocórico de calor, essa transformação ocorre frente ao volume constante, sendo necessário uma fonte quente destinada a elevar muito rapidamente a pressão dos gases (fáscia elétrica) sem que o pistão tenha tempo de se deslocar.
- Processo de expansão adiabática; ocorre o aumento repentino do volume de forma adiabática e o fim desse processo corresponde a uma baixa sensível de pressão.
- Processo de rejeição isocórica de calor, quando a abertura da válvula de escapamento provoca uma baixa considerável de pressão que leva o interior do cilindro à pressão atmosférica enquanto o pistão se encontra no ponto morto inferior.

O ciclo termodinâmico pode ser simplificado considerando algumas condições. O fluido de trabalho se comportar como gás perfeito, as variações de energia potencial e cinética são desprezíveis assim os processos ocorrem em regime permanente. Considerando essa premissa, não há variação de massa no volume de controle e considera-se que a variação de pressão dentro dos cilindros é influenciada por dois fatores:

$$p = p_{cp} + p_{cm} \cdot \sigma \quad (11)$$

Em que p é a pressão dentro do cilindro; p_{cp} representa a pressão do cilindro devido à mudança de volume; p_{cm} é a pressão devido à liberação de calor durante o processo de combustão e σ referente a função unitária.

Geralmente, o início da combustão é acionado pela fáscia, ainda no início o aumento de pressão não é grande o suficiente, portanto a compressão continuará até que o aumento de pressão exerça a força necessária para inverter a direção do pistão em um curso de expansão. A função unitária σ , com subscritos e e d relativos aos cilindros direito e esquerdo, é

introduzida para ativar / desativar a influência da liberação de calor para ambos os cilindros, que é mostrada nas Eqs.12 e 13.

$$\sigma_{e=} \{1, \dot{x} \geq 0, 0, \dot{x} < 0\} \quad (12)$$

$$\sigma_{d=} \{0, \dot{x} \geq 0, 1, \dot{x} < 0\} \quad (13)$$

De acordo com Jia *et al.* (2016), o processo de combustão do FPEG pode ser simplificado como um processo de aquecimento a volume constante. Se não houver transferência de calor para as paredes do cilindro e nenhum vazamento de gás através dos anéis do pistão, a execução ideal do ciclo termodinâmico no FPEG pode ser descrito por dois processos adiabáticos conectados por um processo de liberação de calor a volume constante, ilustrado na Figura 13.

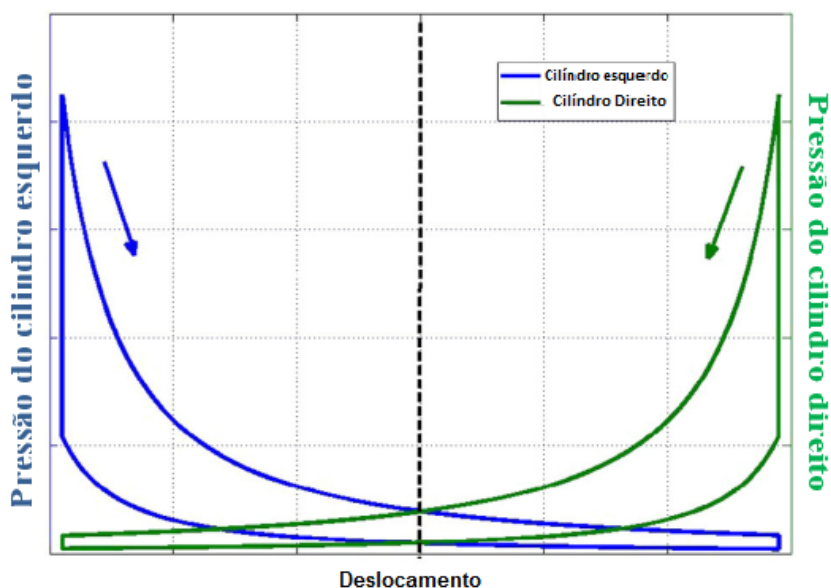


Figura 13: Ciclo ideal de operação do FPGE

Fonte: Adaptado Jia et al, 2016

É possível observar na figura 13 o ciclo ideal de operação do FPEG de pistão duplo, uma vez que ocorre a inversão da maior pressão entre os cilindros esquerdo e direito no ponto central do eixo horizontal, referente ao deslocamento.

Durante o processo de compressão, a pressão interna do cilindro devido à mudança de volume (p_{cp}) é descrita pelas seguintes equações:

$$p_{cp} = P_0 \left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma \quad (14)$$

$$V_0 = L_s \cdot A_B \quad (15)$$

Em que P_0 é a pressão interna do cilindro quando o pistão se encontra em posição de equilíbrio, considerada igual à pressão externa; V_0 é o volume do cilindro quando o pistão se encontra em posição de equilíbrio; V é o volume do cilindro; L_s representa o comprimento do curso do pistão e γ representa o coeficiente politrópico do fluido de trabalho.

O volume da câmara esquerda (V_e) e da câmara direita (V_d) podem ser definidos por:

$$V_e = (L_s + X) \cdot A_B \quad (16)$$

$$V_d = (L_s + X) \cdot A_B \quad (17)$$

A pressão dentro do cilindro devido à liberação de calor pode ser expressa como:

$$V_c = L_c \cdot A_B \quad (18)$$

$$p_{cm} = \Delta p_{cm} \left(\frac{V_c}{V} \right)^\gamma \quad (19)$$

Em que: Δp_{cm} é o aumento de pressão durante o processo de liberação de calor, no qual o valor é o mesmo para ambos lados; L_c é o comprimento da câmara de combustão; e V_c é o volume da câmara de combustão.

Assim a força resultante em cada cilindro pode ser estabelecida como:

$$F_e(X) = A_B \cdot \left(P_0 \left(\frac{L_s}{L_s + X} \right)^\gamma + \Delta p_{cm} \left(\frac{L_c}{L_s + X} \right)^\gamma \cdot \sigma_e \right) \quad (20)$$

$$F_d(X) = A_B \cdot \left(P_0 \left(\frac{L_s}{L_s - X} \right)^\gamma + \Delta p_{cm} \left(\frac{L_c}{L_s - X} \right)^\gamma \cdot \sigma_d \right) \quad (21)$$

2.5.3. Processo de liberação de calor de volume constante

Supondo que o processo de combustão ocorre a volume constante, a diferença de pressão (Δp_{cm}) após o processo de liberação de calor pode ser calculada. Aplicando a primeira lei da termodinâmica entendendo que o cilindro é um sistema, pode ser obtido que:

$$\Delta U = Q_{in} - W \quad (22)$$

Em que: ΔU representa a variação da energia interna da carga no cilindro, Q_{in} é a quantidade de calor liberado no processo de combustão dos gases e W representa o trabalho realizado pela expansão dos gases.

Uma vez que o processo de liberação de calor é considerado um processo a volume constante, o trabalho de saída feito nesta situação é zero. Então, todo o calor liberado do processo de combustão é transferido para aumentar a energia interna do gás no cilindro, assim a variação de energia interna pode ser igualada à quantidade de calor liberado no processo de combustão dos gases (BORGNAKKE, 2009):

$$\Delta U = Q_{in} \quad (23)$$

Se m_{ar0} representa a massa de ar total do cilindro, isto é, em carga máxima. Pode ser aplicado a equação do gás ideal, no qual m_{ar0} pode ser calculado através da equação:

$$P_0 \cdot V_0 = m_{ar0} \cdot R \cdot T_0 \quad (24)$$

Em que R é a constante universal dos gases e T_0 representa a temperatura inicial (K).

A massa de ar de admissão quando o motor não está operando em carga máxima, é representada por m_{ar} (BORGNAKKE, 2009).

$$m_{ar} = K_t \cdot m_{ar0} \quad (25)$$

Em que: K_t é um fator de proporcionalidade variando entre 0 e 1, em função da abertura da válvula de admissão, eficiência volumétrica, etc. Espera-se que o motor seja operado com a mistura ar-combustível estequiométrica. A massa de combustível na mistura (m_{comb}) é determinada pela razão:

$$m_{comb} = \frac{m_{ar}}{AFR_t} \quad (26)$$

$$m_{comb} = K_t \cdot \frac{P_0 \cdot V_0}{R \cdot T_0 \cdot AFR} \quad (27)$$

Considera-se que a mistura ar-combustível e os produtos da combustão tenham comportamento de gás ideal. A massa de combustível (m_{comb}) comparada com a massa de ar (m_{ar}) é pequena. Desta forma, a mistura é tida como o gás ideal e o aumento da energia interna eleva à temperatura da mistura gasosa.

$$\Delta U = C_v (m_{ar} + m_{comb}) \Delta T \quad (28)$$

Em que C_v é o calor específico a volume constante e ΔT a variação de temperatura do fluido de trabalho. Assumindo que Q_{lhv} representa o poder calorífico inferior do combustível e η representa eficiência da combustão, o aumento de pressão Δp_{cm} pode ser expresso como:

$$\Delta p_{cm} = K_t \cdot Q_{lhv} \cdot \eta \frac{p_0 \cdot RC}{T_0 \cdot AFR \cdot V_c} \quad (29)$$

Em que RC representa a relação de compressão geométrica do motor, dada pela razão entre o volume do cilindro (V_0) e o volume da câmara de combustão (V_c).

2.5.4. Aproximação linear da pressão nos cilindros

A comparação entre o mecanismo de funcionamento do FPEG com um sistema de vibração forçada com amortecimento viscoso é possibilitada através da linearização das expressões não lineares no lado direito das equações, que descrevem a força dos gases durante a combustão. De acordo com o trabalho apresentado por Jia *et al.* (2016) a série de Taylor pode ser utilizada nesta pesquisa, e elas são expandidas em torno do ponto de equilíbrio ($X = 0$).

$$F_e(X) = \left(P_0 \left(\frac{L_s}{L_s + x} \right)^Y + \Delta p_{cm} \left(\frac{L_c}{L_s + x} \right)^Y \cdot \sigma_e \right) \quad (30)$$

$$F_d(X) = \left(P_0 \left(\frac{L_s}{L_s - x} \right)^\gamma + \Delta p_{cm} \left(\frac{L_c}{L_s - x} \right)^\gamma \cdot \sigma_d \right) \quad (31)$$

De acordo com Rao (2008) as séries de Taylor para as equações (30) e (31) são dadas por:

$$F_e(X) = F_e(0) + \frac{F'_e(0)}{1!}x + \frac{F''_e(0)}{2!}x^2 + \frac{F^3_e(0)}{3!}x^3 + \dots \quad (32)$$

$$F_d(X) = F_d(0) + \frac{F'_d(0)}{1!}x + \frac{F''_d(0)}{2!}x^2 + \frac{F^3_d(0)}{3!}x^3 + \dots \quad (33)$$

Considerando-se que uma aproximação linear é almejada, todos os termos de alta ordem nas equações acima são negligenciados. A série de Taylor para expansão, apesar do método introduzir um valor médio de erro, a série de primeira ordem prevê um desempenho razoável em tais problemas. A tendência global e o período são semelhantes.

De acordo com Rao (2008) as aproximações lineares são determinadas por:

$$F_e(X) = a_{0e} + a_{1e} \quad (34)$$

$$F_d(X) = a_{0d} + a_{1d} \quad (35)$$

$$a_0 = F(0) \quad (36)$$

$$a_1 = \frac{F'(0)}{1!} \quad (37)$$

$$a_{0e} = P_0 + \Delta p_{cm} \left(\frac{L_c}{L_s} \right)^\gamma \cdot \sigma_e \quad (38)$$

$$a_{1e} = - \left(\frac{\gamma P_0}{L_s} + \Delta p_{cm} \frac{\gamma L_c^\gamma}{L_s^{\gamma+1}} \right) \cdot \sigma_e \quad (39)$$

$$a_{0d} = P_0 + \Delta p_{cm} \left(\frac{L_c}{L_s} \right)^\gamma \cdot \sigma_d \quad (40)$$

$$a_{1d} = \frac{\gamma P_0}{L_s} + \Delta p_{cm} \frac{\gamma L_c^\gamma}{L_s^{\gamma+1}} \cdot \sigma_d \quad (41)$$

Ainda de acordo com o trabalho apresentado por Jia *et al.* (2016) as aproximações lineares da força do gás no cilindro podem ser expressas pelas equações (42) e (43).

$$F_e(X) = \left(P_0 + \Delta p_{cm} \left(\frac{L_c}{L_s} \right)^\gamma \cdot \sigma_e \right) A_B - \left(\frac{\gamma P_0}{L_s} + \Delta p_{cm} \frac{\gamma L_c^\gamma}{L_s^{\gamma+1}} \cdot \sigma_e \right) A_B \cdot X \quad (42)$$

$$F_d(X) = \left(P_0 + \Delta p_{cm} \left(\frac{L_c}{L_s} \right)^\gamma \cdot \sigma_d \right) A_B + \left(\frac{\gamma P_0}{L_s} + \Delta p_{cm} \frac{\gamma L_c^\gamma}{L_s^{\gamma+1}} \cdot \sigma_d \right) A_B \cdot X \quad (43)$$

Substituindo as equações (5) e (43), a equação de vibração forçada final pode ser descrita como:

$$m\ddot{x} + (C_{mag} + C_{mec})\dot{x} + \left(\frac{2\gamma P_0 A}{L_s} + \frac{\Delta p_{cm} A \gamma L_c^\gamma}{L_s^{\gamma+1}} (\sigma_e - \sigma_d) \right) x = \Delta p_{cm} \cdot A_B \left(\frac{L_c}{L_s} \right)^\gamma \quad (44)$$

Considerando que a combustão ocorre de forma alternada em cada cilindro, temos:

$$\sigma_d + \sigma_e = 1 \quad (45)$$

$$\sigma_e - \sigma_d = \begin{cases} 1, & \dot{x} \geq 0 \\ -1, & \dot{x} < 0 \end{cases} \quad (46)$$

A onda quadrada da excitação pode ser descrita por uma Série de Fourier. Se a posição inicial do pistão for assumida como seu ponto morto esquerdo, e a combustão ocorrer à esquerda cilindro, então primeiro modo de $(\sigma_e - \sigma_d)$ é definido pela equação (47). A série de Fourier é demonstrada na Figura 14.

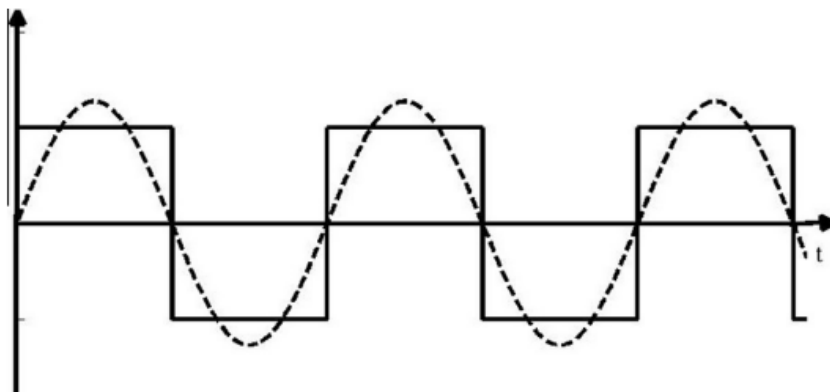


Figura 14 – Onda Retangular e seu primeiro modo da série Fourier

Fonte: Adaptado Jia et al,2016

$$\sigma_e - \sigma_d \approx \frac{4}{\pi} \text{sen}(\omega t) \quad (47)$$

Em que ω é a frequência angular da força de excitação fornecida pela combustão ao longo do tempo (t). Finalmente, substituindo $(\sigma_e + \sigma_d)$ e $(\sigma_e - \sigma_d)$ na Equação (44), obtém-se:

$$m\ddot{x} + (C_{mag} + C_{mec})\dot{x} + \left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot P_0 \cdot A}{L_s} + \frac{\Delta p_{cm} \cdot A \cdot \gamma L_c^\gamma}{L_s^{\gamma+1}} (1) \right) x = \Delta p_{cm} \cdot A_B \left(\frac{L_c}{L_s} \right)^\gamma \cdot \left(\frac{4}{\pi} \text{sen}(\omega t) \right) \quad (48)$$

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_0 \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (49)$$

Em que:

$$K = \frac{2 \cdot \gamma \cdot P_0 \cdot A}{L_s} + \Delta p_{cm} \frac{\gamma L_c^\gamma \cdot A}{L_s^{\gamma+1}} \quad (50)$$

$$F_0 = \frac{4}{\pi} \Delta p_{cm} \cdot A_D \left(\frac{1}{RC} \right)^\gamma \quad (51)$$

$$C = C_{mag} + C_{mec} \quad (52)$$

O coeficiente de amortecimento elétrico (C_{mag}) é determinado em função do amortecimento crítico do sistema dinâmico (C_{crit}), onde f_c é um fator de proporcionalidade, que pode assumir valores entre 0,1 e 0,7, conforme apresentado pela equação (53):

$$C_{mag} = f_c \cdot C_{crit} \quad (53)$$

$$C_{crit} = 2 \cdot m \cdot \omega_n = 2\sqrt{k \cdot m} \quad (54)$$

Segundo (Heywood,1998) por não haver grandes cargas laterais nas paredes do cilindro e devido ao número reduzido de elementos mecânicos, a perda de potência do FPEG é reduzida quando comparada aos motores convencionais, sendo estimada em 10% da potência gerada pelo motor.

$$C_{mec} = 0,1 \cdot C_{mag} = 0,1 \cdot f_c \cdot 2 \cdot m \cdot \omega_n \quad (55)$$

A frequência natural do sistema é dada pela equação (56).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{2\gamma P_0 A}{L_s} + \Delta p \frac{\gamma L_c^{\gamma} A}{cm L_s^{\gamma+1}} \right)}{m}} \quad (56)$$

Segundo Rao (2008) um sistema massa mola geralmente oscila com uma frequência natural e um sistema ideal trabalha próximo a esta frequência natural, exigindo o mínimo de energia adicional para manter seu funcionamento. Portanto, a solução da equação (48) é obtida por meio da teoria de vibração e o deslocamento do sistema de um grau de liberdade com amortecimento submetido a uma excitação externa é definido por:

$$x = - \frac{F_0 \cdot \cos(\omega_n \cdot t)}{C \omega_n} \quad (57)$$

1.3 Combustível

Segundo Brunetti (2012), o uso do petróleo se desenvolveu a partir do século XIX, principalmente graças a utilização de querosene e gás natural para iluminação e ao rápido aumento do uso de automóveis nas últimas décadas, gerando grande demanda de combustível e assim tornando a indústria do petróleo sólida e estável.

Ainda segundo Brunetti (2012) no Brasil, apesar da adição de álcool etílico à gasolina ser realizada desde 1935, em teores da ordem de 5%, somente em 1980 iniciou-se a adição de 20 a 22%, e atualmente variando de 20 a 25%, em função de oscilações na produção de álcool.

A participação de energias renováveis na matriz energética brasileira nos últimos 18 anos manteve-se entre as maiores do mundo segundo, com cerca de 40% conforme os dados da EPE (2017), apesar desse percentual o uso de energia não renovável representa mais de 56% de toda a energia consumida no país, como pode ser observado na Figura 14.

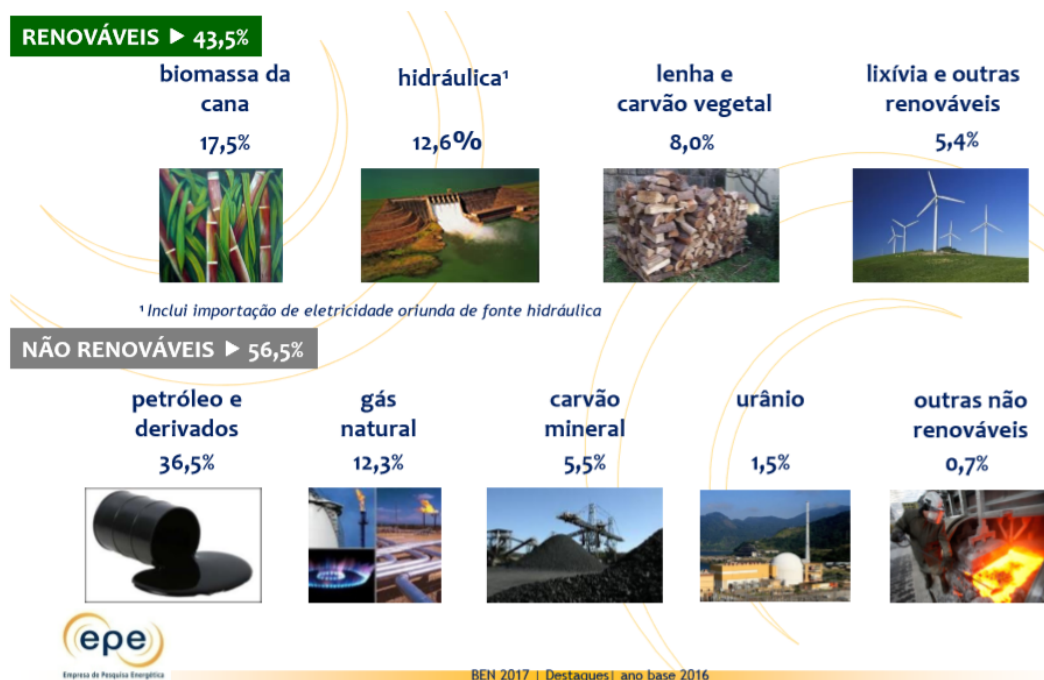


Figura 14: Repartição da oferta interna de energia no Brasil em 2016
Fonte: EPE, 2017

Brunetti (2012) descreve a octanagem, ou número de octanos, como a grandeza que representa a resistência da mistura do combustível com ar à autoignição, responsável pela detonação. Uma representação esquemática dos domínios de oxidação lenta e de autoignição para uma mistura de n-heptano/ar pode ser observada na Figura 15.



Figura 15: Oxidação lenta e autoignição para uma mistura de n-heptano/ar
 Fonte: (BRUNETTI, 2012)

A estrutura e o tamanho das estruturas de hidrocarbonetos individuais são fatores que influenciam na resistência à autoignição, além das condições de trabalho do motor. Brunetti (2012) fala ainda que em geral a pressão atmosférica, para álcoois, compostos aromáticos e hidrocarbonetos leves fica na faixa entre 500°C e 600°C. Observa-se também na Figura 1515 que com o aumento da pressão, a temperatura de autoignição tende a diminuir.

1.3.1 Rendimento da combustão

Brunetti (2002) fala que o rendimento da combustão (η_c) é a relação entre o calor que teoricamente o combustível poderia fornecer (poder calorífico) e o que realmente é aproveitado. A diferença entre estes calores mostra a combustão incompleta ou outros fatores como a dissociação.

$$\eta_c = \frac{Q_{in}}{m_{comb} \cdot Q_{lHV}} \quad (58)$$

Em que: Q_{in} é a taxa de transferência de calor fornecido pela combustão (kW); m_{comb} é a massa do combustível (kg) e Q_{lHV} o poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg).

1.3.2 Rendimento Teórico

Brunetti (2002) fala ainda que o rendimento teórico fornece a relação entre o calor que é aproveitado do fluido e o trabalho que teoricamente será possível produzir. De acordo com a segunda lei da termodinâmica, o rendimento teórico (n_t) do motor de combustão interna está diretamente relacionado com a relação de compressão.

$$n_t = \frac{W_t}{Q_a} \quad (59)$$

Sendo: W_t o trabalho do ciclo e Q_a o calor aproveitado.

De acordo com Brunetti (2012) o estudo dos ciclos reais se torna difícil devido à complexidade da composição dos combustíveis que varia durante os processos, além da complexidade dos próprios processos. Porém, para facilitar este estudo e chegar a conclusões qualitativas e quantitativas, associa-se o ciclo real ao ideal (padrão) considerando as seguintes hipóteses:

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

Associadas todas as hipóteses apresentadas é possível obter os diagramas p-V e T-S, mostrados na Figura 16.

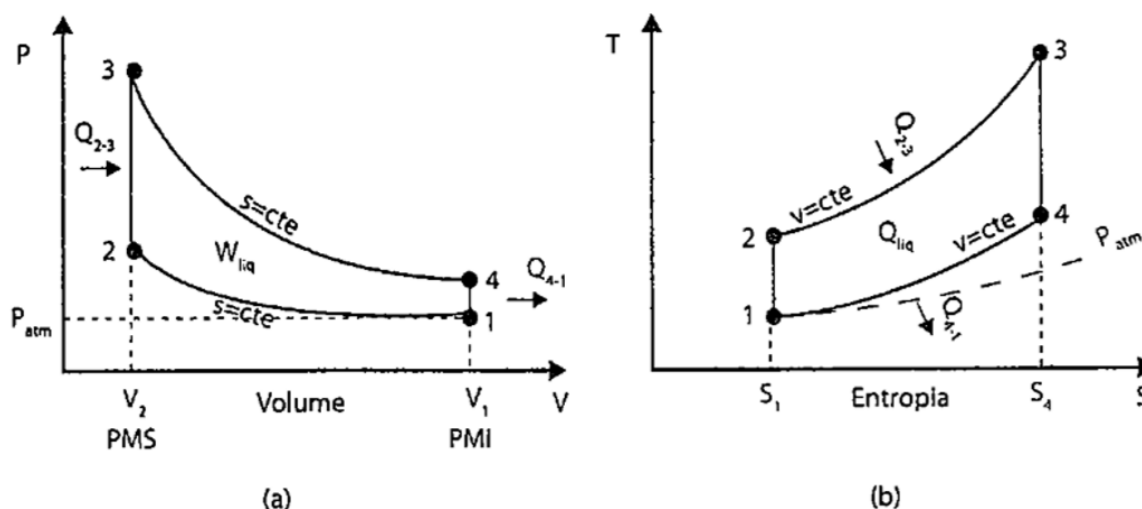


Figura 16: Diagrama P-V e T-S do ciclo Otto

Fonte: (BRUNETTI, 2012)

Nos diagramas da Figura 16 volume e entropia dependem da massa do fluido ativo (sistema) e assim do tamanho do motor. Portanto, pode-se aumentar o rendimento alterando a pressão e a temperatura, sem mudanças geométricas no motor.

Segundo BRUNETTI (2012), a potência (P_{ot}) pode ser definida como a quantidade de trabalho (W_t) realizado por unidade de tempo (Δt):

$$P_{ot} = \frac{W_t}{\Delta t} \quad (60)$$

De acordo com Zhou (2018), motores a pistão livre são considerados flexíveis quanto aos ajustes mecânicos, pois têm curso do pistão e relação de compressão variável de acordo com o funcionamento da carga e dispositivo de ressalto. Assim é mais fácil adequar o funcionamento do motor a diferentes tipos de combustível sem grandes perdas no rendimento, quando comparado aos motores convencionais.

Ainda segundo Zhou (2018), a combustão espontânea tem sido usada nos conceitos do FPE. No entanto, há menos exemplos na literatura devido às dificuldades adicionais associadas ao projeto e teste experimental de MEI em comparação com MIF em FPEs. Como um modo de combustão estabelecido, o MIF foi considerado em muitos conceitos de FPE

porque o tempo de ignição pode ser usado como um meio de controlar a fase de combustão e, portanto, o movimento do pistão.

2 METODOLOGIA

Esse capítulo trata dos procedimentos e características da pesquisa, objetivando determinar os materiais e métodos para sua realização, bem como os instrumentos de coleta de dados e a maneira que são tabulados.

2.1 Tipos de pesquisa

Richardson *et al.* (1989) afirmam que, de forma ampla, pode-se classificar a pesquisa em dois grandes métodos: o quantitativo e o qualitativo. De acordo com Lakatos e Marconi (2010), o método quantitativo pode ser definido como aquele que apresenta quantificações tanto na coleta de informações, quanto em seu tratamento por meio de técnicas estatísticas. Para Richardson *et al.* (1989), o método quantitativo representa a intenção de garantir a precisão dos resultados, evitar distorções de análise, possibilitando, conseqüentemente, uma margem de segurança quanto as inferências.

Em contrapartida, Creswell (1998) afirma que para uma pesquisa qualitativa, devem ser coletados dados empíricos, como histórico de ocorrências, fatos e fatos em que são observados problemas relacionados à pesquisa, e estudos de casos de locais com a mesma ou semelhante realidade da estudada. Desta forma, é possível ser feita uma análise dos fenômenos e do ambiente, possibilitando a interpretação dos problemas envolvidos.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, Andrade (2006) afirma que quando elaborada a partir de material escrito e gravado já publicados, constituído principalmente de livros, material de áudio e anais de simpósios, congressos, artigos e periódicos que atualmente estão publicados na internet, a pesquisa é bibliográfica. Já a pesquisa experimental determina o objeto de estudo, seleciona variáveis capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

Andrade (2006) diz ainda que a pesquisa experimental geralmente é feita por amostragem e se considera que os resultados encontrados para uma amostra, ou grupo de amostras, serão válidos para a população de um modo geral.

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de um motor a pistão livre aplicado a carros híbridos, portanto trata-se de uma pesquisa de natureza qualitativa e bibliográfica.

2.2 Materiais e Métodos

A Figura 17: 17 auxilia a visão da estrutura e desenvolvimento deste trabalho.

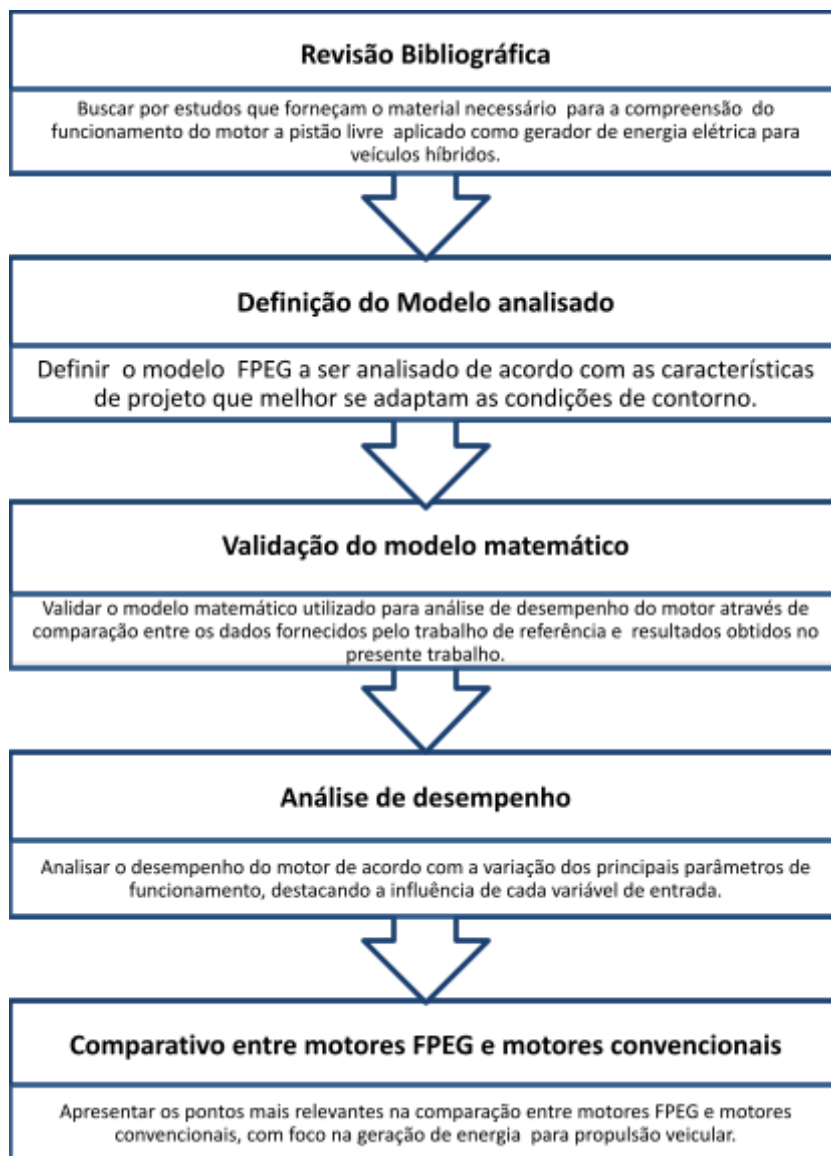


Figura 17: Fluxograma de desenvolvimento do trabalho

Fonte: Pesquisa direta, 2021

O trabalho originou-se de uma pesquisa bibliográfica acerca dos temas relacionados ao uso do motor de pistão livre em carros híbridos, seu funcionamento, benefícios e malefícios, possível opção de fonte energética frente à dependência dos combustíveis fósseis, menor

geração de poluentes lançados para a atmosfera, melhor custo/benefício para utilização de um veículo em longo prazo.

Após estudos baseados na bibliografia apresentada no capítulo dois, foram observados os requisitos necessários para aplicação do FPEG em veículos híbridos e suas condições de contorno mais adequadas, logo após foi definido o arranjo mecânico do motor a ser analisado. Com as condições de contorno definidas foram analisadas suas principais variáveis de operação e seus respectivos resultados.

Com o intuito de garantir a fidelidade dos resultados encontrados ao analisar o desempenho do motor a pistão livre operando em diferentes regimes de funcionamento, foi empregado o modelo matemático proposto por Jia et al. (2016) em seu trabalho: “*A fast response free-piston engine generator numerical model for control applications*”, baseando-se em um FPEG similar ao analisado no presente trabalho. O protótipo tomado como referência foi desenvolvido pela universidade de New Castle no Reino Unido em junho de 2015.

2.3 Variáveis e indicadores

De acordo com Gil (1999), variável é tudo aquilo que pode assumir diferentes valores, desde o ponto de vista quantitativo ou qualitativo. Variáveis também podem ser definidas como sendo quaisquer ocorrências que podem ser classificadas em duas ou mais categorias. Podem ser consideradas como uma medida ou classificação, uma quantidade que varia, um conceito operacional que contém valores, propriedade, aspectos ou fatores que são identificados em um objeto de estudo e passíveis de verificação. Os indicadores são específicos e concretos que representam algo mais abstrato ou difícil de precisar. O processo de encontrar os indicadores que permitem conhecer o comportamento das variáveis é o que chamamos operacionalização. A tabela 4 apresenta as variáveis e indicadores deste trabalho.

Tabela 4: Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Desempenho do motor	- Combustível (Gasolina e Etanol) - Pressão e temperatura de entrada - Relação de compressão
Poluentes	- Gases de exaustão - Temperatura máxima atingida

Fonte: Pesquisa direta, 2021

2.4 Instrumentos e Coleta de dados

Os instrumentos de coleta de dados utilizados no presente trabalho são:

- Pesquisa bibliográfica
- *Software* Microsoft Excel
- *Software* Microsoft Word
- *Software Lotus Engine Simulation*

2.5 Tabulação dos Dados

A tabulação e organização dos dados serão feitas em tabelas, planilhas e gráficos no *software* Excel, permitindo uma melhor visualização dos dados e facilidade na resolução dos cálculos. Posteriormente as propriedades termodinâmicas inerentes ao combustível serão realizadas utilizando o *Software Lotus Engine Simulation*.

2.6 Considerações Finais

Neste capítulo são mostradas as ferramentas necessárias para realização da pesquisa e projeto, destacando os *softwares* e instrumentos utilizados, além de ter delimitado a área em que ocorre esta pesquisa, e também como são obtidos e tabulados os dados. No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos e sua discussão.

3 RESULTADOS

Com o objetivo de verificar o modelo matemático abordado ao longo do trabalho, neste capítulo é feita a comparação dos resultados obtidos com os resultados apresentados por Jia et al. (2016) em seu trabalho: “*A fast response free-piston engine generator numerical model for control applications*”. O protótipo analisado foi desenvolvido pela universidade de New Castle no Reino Unido em junho de 2015.

Após a validação do modelo matemático será realizada a análise termodinâmica do motor a pistão livre operando com etanol, por apresentar características favoráveis a preservação ambiental e demais demandas da indústria automobilística descritas no capítulo 2. Algumas variáveis de entrada relacionadas ao combustível utilizado serão alteradas e os resultados relativos serão analisados.

O modelo dinâmico linear utilizado foi desenvolvido em planilha do *software* Excel, usando parâmetros e dados de testes obtidos do protótipo de FPEG conforme apresentado na Figura 18.

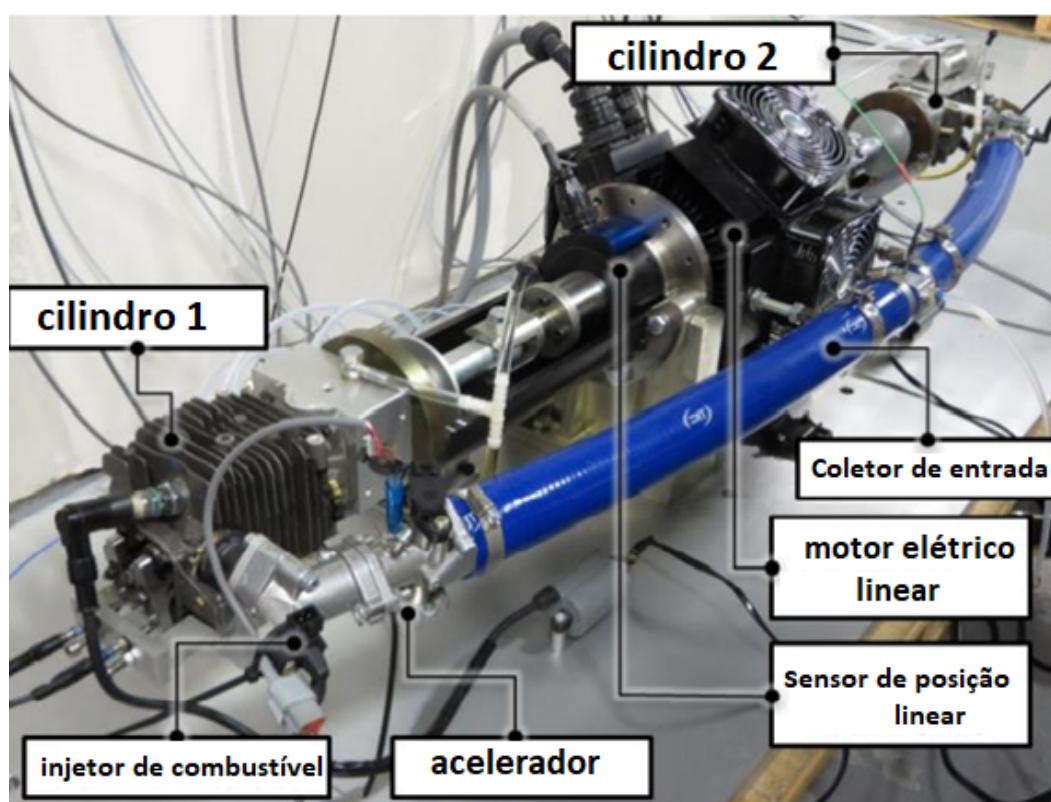


Figura 18: Esquema mostrando as partes do protótipo do FPEG desenvolvido pela universidade de New Castle.

Fonte: Adaptado Hanipah, 2015

As especificações do protótipo do FPEG analisado por Jia et al (2016) que são usadas como parâmetros de entrada neste trabalho, podem ser visualizadas na Tabela 5.

Tabela 5: Especificações do protótipo

Parâmetro	Valor
Diâmetro (A_D)	52,5 (mm)
Curso máximo (L)	70 (mm)
Curso (L_s)	35 (mm)
Massa (m)	5 (kg)
Coefficiente de carga do gerador linear (C)	395 (N/m.s ⁻¹)
Temperatura ambiente (T_0)	298,15 (K)
Pressão de admissão (p_0)	101,325 (kPa)

Fonte: Adaptado de Jia et al, 2016

Os parâmetros de projeto descritos na tabela 5 são relativos à geometria e configuração de operação do modelo.

3.1 Validação dos dados

Algumas considerações foram feitas a fim de possibilitar a obtenção dos resultados: o valor do coeficiente de amortecimento (c) foi considerado constante, representado pelo coeficiente da força da carga. O coeficiente está em função dos parâmetros operacionais do gerador linear. Adotou-se como combustível o etanol e a relação de compressão foi baseada nos resultados encontrados por Jia et al. (2014), em suas simulações do protótipo. Os demais dados como o comprimento do curso, a razão ar-combustível (AFR), o coeficiente politrópico, a eficiência de combustão, e o calor específico a volume constante são definidos como variáveis de entrada, e os valores assumidos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Variáveis de entrada

PARÂMETRO	VALOR
Câmara de Combustão (L_c)	2,7 (mm)
Relação de Compressão (RC)	13,7
Relação Ar Combustível (AFR)	15
Relação entre capacidade térmica (γ)	1,37
Eficiência na Combustão (η)	1
Poder Calorífico Inferior (Q_{lhv})	42,5 (MJ/kg)
Calor Específico a Volume Constante (c_v)	0,776 (kJ/kg.k)

Fonte: Pesquisa direta, 2021

É possível observar no gráfico da Figura 19, o comportamento do motor sob uma frequência de trabalho de 20 hz. Em seguida, na Figura 20, é apresentado o gráfico obtido por Jia et al. (2016) na mesma frequência de operação.

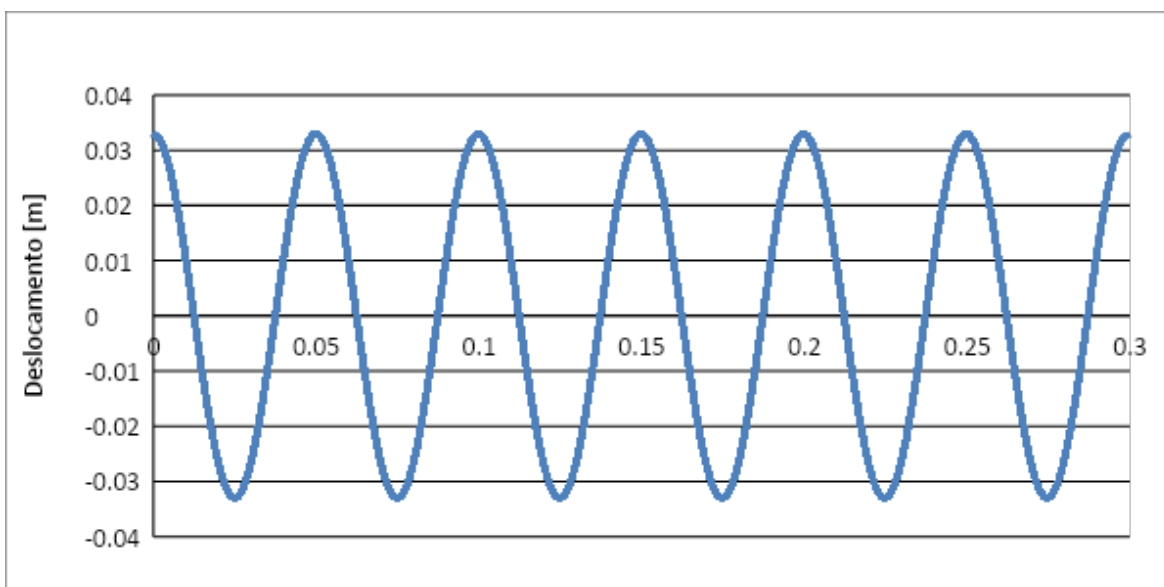


Figura 19: Deslocamento em função do tempo

Fonte: Pesquisa direta, 2021

Por se tratar de um modelo idealizado e simplificado da real operação do motor, o deslocamento do pistão dentro do cilindro pode ser observado na figura 19 através de uma curva senoidal harmônica ao longo do tempo, sem que haja oscilações ou perturbações do seu movimento. O gráfico apresentado na figura 20 permite observar a diferença de fase entre o movimento do pistão descrito pelo modelo matemático apresentado por Jia et al. (2016) e o movimento real descrito pelo pistão do protótipo do FPEG analisado.

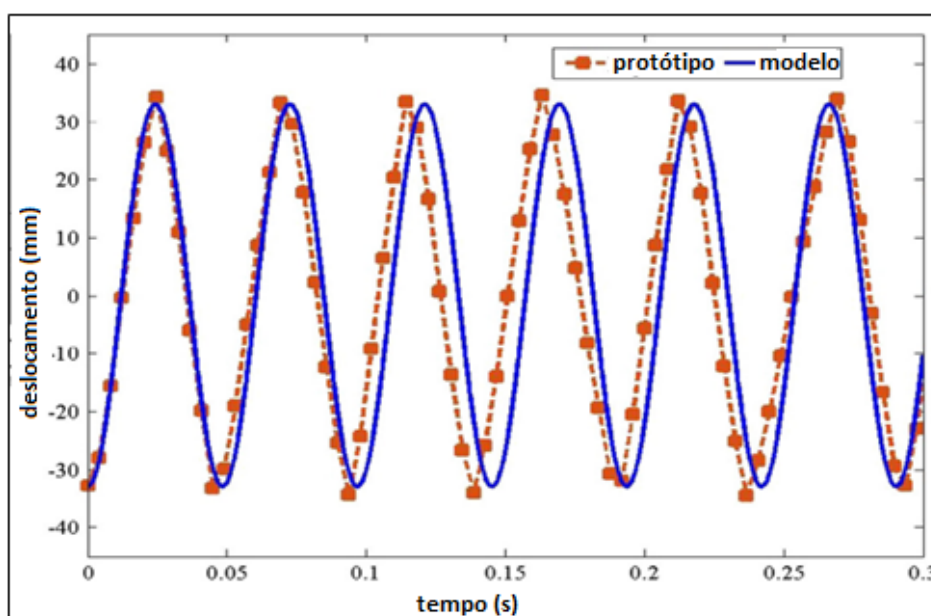


Figura 20: Deslocamento por tempo do protótipo e modelo analisado por Jia et al (2016)

Fonte: Adaptado de Jia et al, 2016

A amplitude representada no gráfico da Figura 20 descreve o deslocamento máximo que o pistão atinge. Obteve-se na simulação um deslocamento máximo de 32,95 mm enquanto que nos dados de referência, proposto por Jia *et al.* (2016), o deslocamento obtido foi de 33,20 mm. É importante salientar o valor de deslocamento máximo do pistão, pois o deslocamento acima de 35,00 mm resultaria em colisão entre o pistão e a parede do cilindro.

A diferença entre os valores de amplitude, são devidos aos valores referentes as variáveis de entrada adotados na análise, que são diferentes daqueles utilizados no trabalho de referência. Além disso, as condições de contorno iniciais assumidas, como o ponto de partida do pistão, propriedades termodinâmicas do combustível e a dimensão da câmara L_c , não são exatamente iguais aos parâmetros utilizados na análise de referência; todos esses fatores são

diretamente relacionados aos resultados encontrados, pois alteram a magnitude da força aplicada nos cilindros e conseqüentemente o deslocamento máximo.

3.2 Desempenho do FPEG operando a gasolina

Inicialmente foi realizado a análise do modelo operando a gasolina, assim como o protótipo usado como referência, as mesmas variáveis definidas inicialmente foram mantidas. Adotou-se que o pistão esquerdo partia do ponto morto inferior, na posição de 33,2 mm, e estava na eminência de iniciar o processo de combustão, de modo que a velocidade neste momento é zero, assim como pode ser observado no gráfico de velocidade por deslocamento apresentado na figura 22.

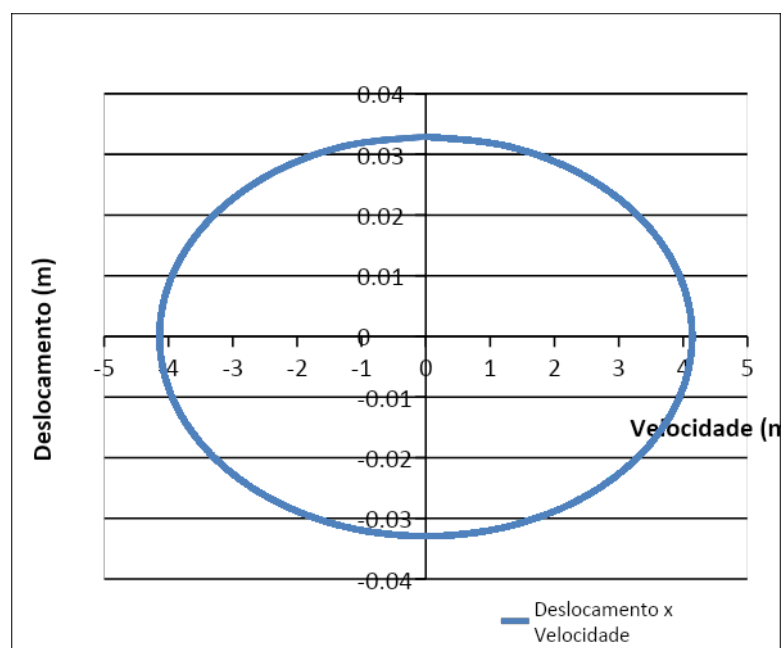


Figura 21: Deslocamento em função da velocidade FPEG operando com gasolina

Fonte: Pesquisa direta, 2021

O gráfico da Figura 21 traça a curva esférica, representando o deslocamento e a velocidade relativa do pistão em relação ao cilindro, sob a excitação de uma força a frequência de 20 Hz, permitindo observar a velocidade máxima no centro do cilindro, representado pelo ponto zero do eixo y, relativo ao deslocamento.

É possível observar no gráfico da Figura 22 a velocidade do pistão em função do tempo, no qual a amplitude máxima da velocidade é de 4,14 m/s e a velocidade média em torno de 2,61 m/s.

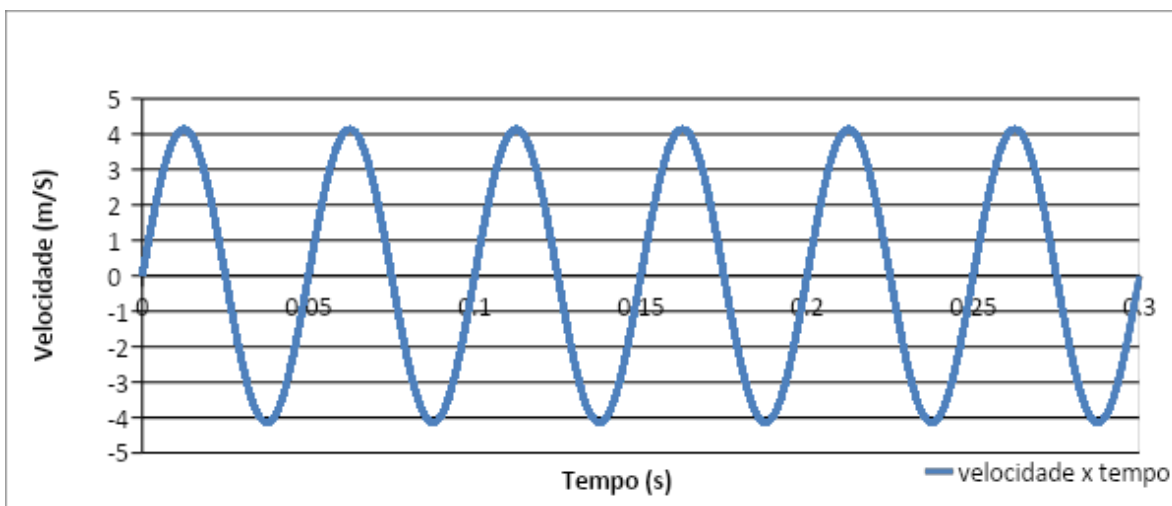
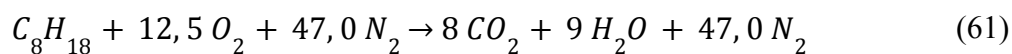


Figura 22: Velocidade em função do tempo FPEG operando com gasolina

Fonte: Pesquisa direta, 2021

De acordo com a Figura 22, é possível observar que a capacidade de movimentação do pistão é função das forças aplicadas sobre ele, ou seja, o processo de combustão influencia diretamente na amplitude do deslocamento do motor assim como na sua velocidade. Uma vez que os parâmetros geométricos e relativos aos mecanismos de funcionamento do motor foram mantidos e apenas os dados de entrada relativos ao combustível e suas propriedades termodinâmicas, os resultados e gráficos obtidos no presente trabalho permitem observar um comportamento do motor similar ao analisado por Jia et al. (2016) quando excitado sob a mesma frequência de 20 Hz. As principais discordâncias entre os resultados estão em parâmetros relacionados a magnitude da força de excitação, como a velocidade e o deslocamento máximo do pistão, deste ponto de vista os erros encontrados são justificáveis e aceitáveis. Assim, considera-se que a equação dinâmica de vibração forçada de um grau de liberdade apresentada é robusta o suficiente para descrever de forma simplificada o desempenho real do motor, possibilitando analisar a dinâmica do motor em diferentes regimes de funcionamento.

As propriedades termodinâmicas utilizadas são referentes à gasolina comercial, a reação química estequiométrica de combustão é apresentada na equação (61).



De acordo com a reação estequiométrica apresentada na equação 61, a relação ar combustível (AFR) considerada para a gasolina é de 15:1.

O gráfico de pressão por volume apresentado na figura 23, assim como o gráfico de temperatura por entropia apresentado na figura 24, permite visualizar as curvas características dos ciclos do motor operando a gasolina.

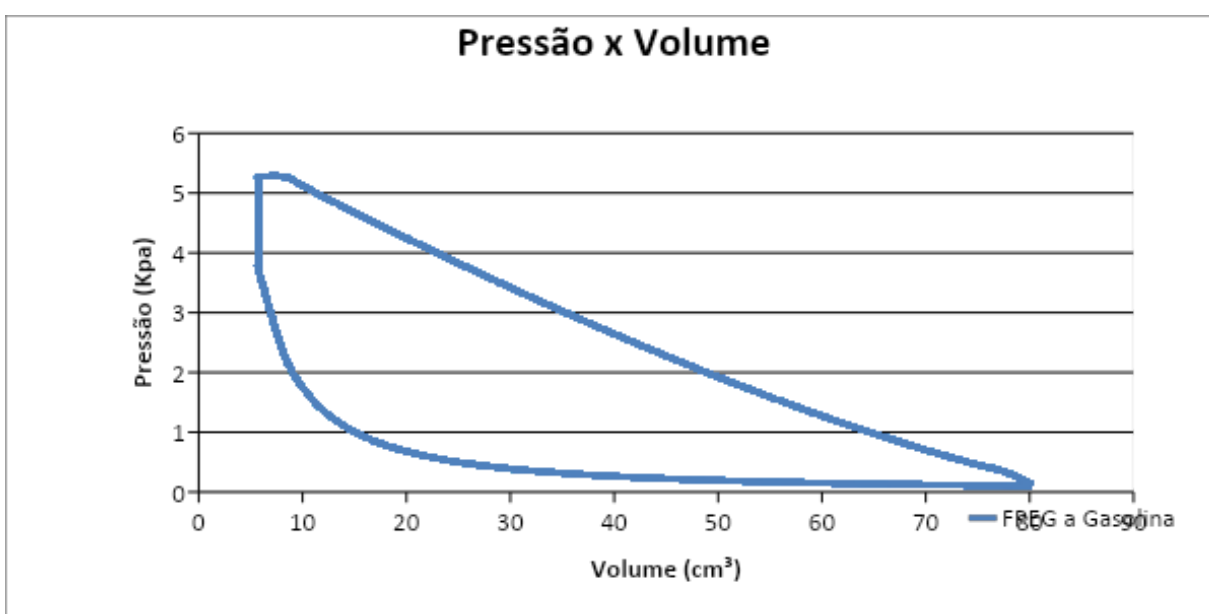


Figura 23: Pressão em função do volume para o FPEG a gasolina

Fonte: Pesquisa direta, 2021

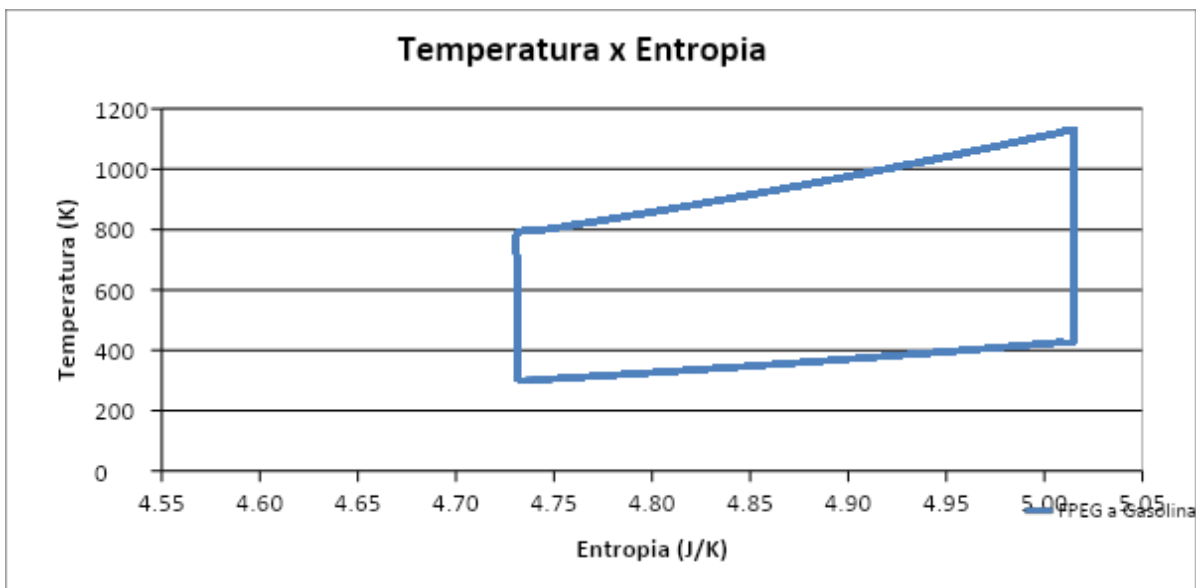


Figura 24: Temperatura em função da entropia para o FPEG a gasolina

Fonte: Pesquisa direta, 2021

A tabela 7 contém os valores de pressão, volume e temperatura correspondentes a cada um dos 4 pontos do ciclo do motor descritos na figura 17. Os resultados foram obtidos considerando a gasolina como combustível. Vale destacar a temperatura máxima atingida pelo motor no ponto 3 operando a gasolina, indicando 1156,30 K.

Tabela 7: Pressão, temperatura e volume nos pontos 1, 2, 3 e 4 do ciclo do motor a gasolina

Ponto 1		Ponto 2	
Pressão (kPa)	101,33	Pressão (kPa)	3656,15
Temperatura (K)	298,15	Temperatura (K)	785,27
Volume (m ³)	$8,01 \cdot 10^{-5}$	Volume (m ³)	$5,84 \cdot 10^{-6}$
Ponto 3		Ponto 4	
Pressão (kPa)	5383,62	Pressão (kPa)	149,00
Temperatura (K)	1156,30	Temperatura (K)	439,02
Volume (m ³)	$5,84 \cdot 10^{-6}$	Volume (m ³)	$8,01 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Pesquisa direta, 2021

Os dados apresentados na tabela 8 permitem uma análise detalhada do desempenho do motor a pistão livre operando a gasolina com frequência de excitação de 20Hz.

Tabela 8: Desempenho termodinâmico FPEG operando a Gasolina

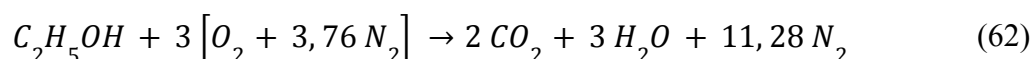
Q_{in}	287,91 (J)	F_0	1391,27 (N)
m_{ar0}	0,095 (kg)	T_{mec}	729,43 (J)
m_{comb}	$6,77 \cdot 10^{-3}$ (kg)	$P_{ot\ mec}$	2,92 (kW)
Δp_{cm}	18,21 (Mpa)	P_{ot}	9,76 (kW)
K	56,68 (kJ/m)	$P_{ot\ ele}$	2,41 (kW)
C	325,61 (N/m.s)	T_{ele}	602,48 (J)
C_{mag}	296,01 (N/m.s)	$\eta_{mecânica}$	83%
C_{crit}	1064,63 (N/m.s)	$\eta_{conversão}$	25%
C_{mec}	29,60 (N/m.s)	$\eta_{térmica}$	55%

Fonte: Pesquisa direta, 2021

Os valores obtidos na tabela 8 em conjunto com o que foi apresentado na bibliografia do capítulo 2, permitem observar o aproveitamento energético do motor a pistão livre quando comparado aos demais motores que operam no ciclo Otto, pois a eficiência de conversão está acima dos valores alcançados por motores convencionais, chegando a 25% de eficiência de conversão de energia.

3.3 Análise termodinâmica FPEG operando a etanol

Foi feita análise termodinâmica do FPEG operando com etanol, a relação ar combustível assim como suas propriedades termodinâmicas, foram reajustadas de acordo com as condições necessárias para uma combustão satisfatória da mistura. A reação química estequiométrica do Etanol é apresentada na equação (62).



De acordo com a reação estequiométrica apresentada na equação 61, a relação ar combustível (AFR) considerada para o etanol é de 9:1.

Os valores de pressão, temperatura e volume nos pontos 1, 2, 3 e 4 descritos na figura 17, são apresentados na tabela 9. Vale destacar a temperatura máxima atingida pelo motor no ponto 3 operando a etanol, indicando 1161,34 K.

Tabela 9: Pressão, temperatura e volume nos pontos 1, 2, 3 e 4 do ciclo FPEG operando a Etanol.

Ponto 1		Ponto 2	
Pressão (kPa)	101,33	Pressão (kPa)	3656,15
Temperatura (K)	298,15	Temperatura (K)	785,27
Volume (m ³)	$8,01 \cdot 10^{-5}$	Volume (m ³)	$5,84 \cdot 10^{-6}$
Ponto 3		Ponto 4	
Pressão (kPa)	5407,07	Pressão (kPa)	150,00
Temperatura (K)	1161,34	Temperatura (K)	441,03
Volume (m ³)	$5,84 \cdot 10^{-6}$	Volume (m ³)	$8,01 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Pesquisa direta, 2021.

Analisando os dados da tabela 9 em comparação a tabela 7, é possível observar que o volume se manteve constante nos respectivos pontos, já que a taxa de compressão não foi alterada. Os valores de pressão e temperatura nos pontos 1 e 2 se mantiveram próximos, como era de se esperar considerando que ambos têm o ar como fluido de trabalho durante o processo de compressão.

Os valores de pressão e temperatura relativos ao ponto 3 foram elevados quando comparados ao ciclo operando a Gasolina, apontando um possível ganho tanto na potência quanto na eficiência do FPEG operando a Etanol. A pressão e a temperatura no início do processo de exaustão, indicadas no ponto 4, tiveram um aumento discreto em relação a gasolina, resultando em um ΔT de 720,31 graus durante o processo de expansão dos gases.

O deslocamento máximo do pistão operando a Etanol foi de 34,29 mm à frequência de 20hz, levando em conta a alteração da relação ar combustível, assim como os resultados apresentados na tabela 9, o aumento do deslocamento máximo já era esperado. A velocidade máxima também foi superior, alcançando a magnitude de 4,31 m/s.

Tabela 10: Desempenho termodinâmico FPEG operando a Etanol

Q_{in}	291,83 (J)	F_0	1410,07 (N)
m_{ar0}	0,095 (kg)	T_{mec}	739,33 (J)
m_{comb}	$9,67 \cdot 10^{-3}$ (kg)	$P_{ot\ mec}$	2,96 (kW)
Δp_{cm}	18,46 (Mpa)	P_{ot}	9,95 (kW)
K	57,25 (kJ/m)	$P_{ot\ ele}$	2,42 (kW)
C	327,46 (N/m.s)	T_{ele}	605,37 (J)
C_{mag}	297,44 (N/m.s)	$\eta_{mecânica}$	82%
C_{crit}	1070,50 (N/m.s)	$\eta_{conversão}$	24%
C_{mec}	29,74 (N/m.s)	$\eta_{térmica}$	54%

Fonte: Pesquisa direta, 2021

Apesar do aumento no deslocamento do pistão operando a etanol, inclusive alcançando valores próximos ao limite físico do cilindro, é importante destacar que a eficiência de conversão de energia do FPEG a etanol se manteve em 24%, como pode ser observado na tabela 10, muito próxima se comparado ao rendimento operando a gasolina. Considerando que a relação de compressão se manteve a mesma, e que, em motores convencionais de combustão interna a eficiência mecânica tem relação direta com a taxa de compressão, pode-se entender que o caráter vibratório de funcionamento do motor foi responsável por minimizar a perda de energia mecânica no sistema proporcionando maior eficiência mecânica. Pois o comportamento do motor sendo análogo a um sistema massa/mola onde a mola atua como acumulador de energia mecânica e consequentemente uma fonte de propulsão, onde a rigidez da mola será proporcional ao combustível utilizado.

3.3.1 Variação da pressão e temperatura de entrada

De acordo com o estudo bibliográfico descrito no presente trabalho, o aumento da pressão de admissão tende a elevar a potência do motor, e assim como era de se esperar a análise do FPEG em alta pressão operando a etanol resultou em valores discrepantes da realidade, pois o deslocamento do pistão excedeu o comprimento do cilindro. A eficiência do motor seguiu a mesma tendência do deslocamento e chegou a valores impraticáveis, como pode ser observado na tabela 11.

Tabela 11: Variação de desempenho do FPEG de acordo com a temperatura e pressão iniciais

Temperatura inicial 350 K		Pressão inicial 200 kPa	
Deslocamento do pistão (mm)	30,90	Deslocamento do pistão (mm)	48,18
Eficiência térmica	60%	Eficiência térmica	34%
Potência mecânica (kW)	2,6	Potência mecânica (kW)	5,83
Temperatura inicial 400 K		Pressão inicial 300 kPa	
Deslocamento do pistão (mm)	28,27	Deslocamento do pistão (mm)	59,00
Eficiência térmica	66%	Eficiência térmica	26%
Potência mecânica (kW)	2,2	Potência mecânica (kW)	8,75

Fonte: Pesquisa direta, 2021

O aumento da temperatura inicial do fluido de trabalho levou a uma redução da amplitude do deslocamento do pistão, assim como a redução da potência do motor. A figura 26 descreve o comportamento do motor de acordo com a variação da relação de compressão.

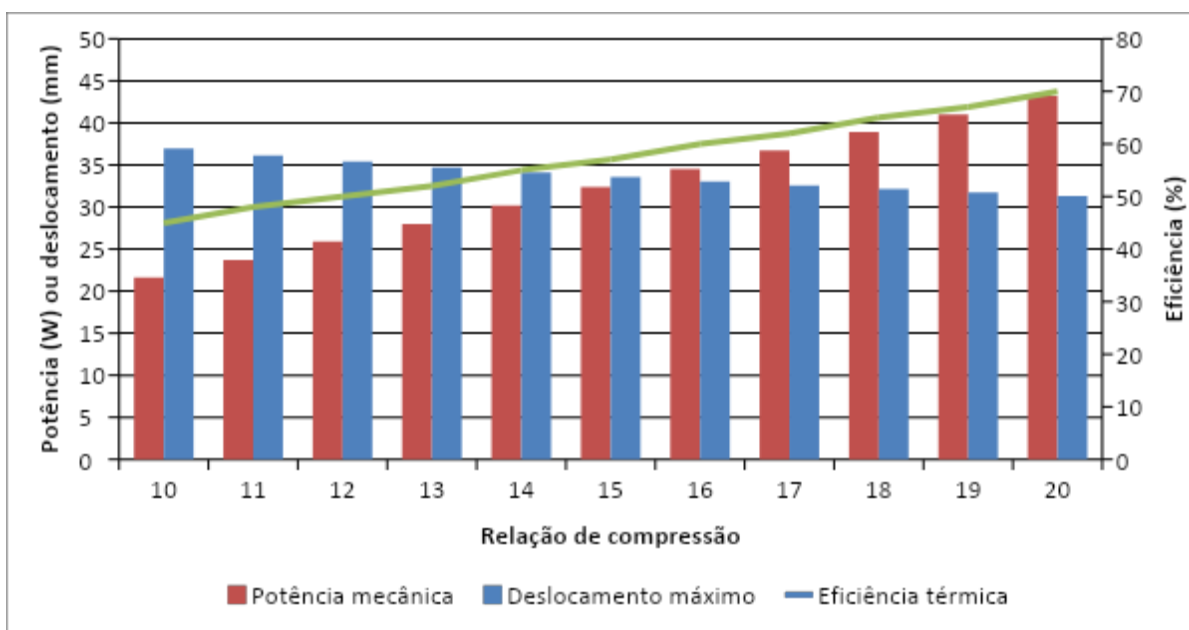


Figura 26: Variações relativas da potência mecânica, eficiência térmica e deslocamento máximo em relação à relação de compressão.

Fonte: Pesquisa direta, 2021

A figura 26 descreve o comportamento do motor de acordo com a variação da relação de compressão entre 10 e 20. A potência mecânica e a eficiência térmica são diretamente

proporcionais à relação de compressão. Por outro lado, o deslocamento máximo do pistão tem comportamento inverso e decai a medida que a relação de compressão aumenta. É possível observar um comportamento particular do FPEG quando comparado aos motores convencionais, já que o aumento do regime de operação do motor está limitado a uma faixa restrita da relação de compressão sendo inviável o seu funcionamento fora desta faixa.

4 CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta as conclusões do trabalho apresentado e também as recomendações para trabalhos futuros.

4.1 Conclusão

Por fim, considera-se que o presente trabalho alcançou os objetivos propostos. O mecanismo de funcionamento característico do FPEG foi tratado de forma análoga a um sistema massa-mola com amortecimento viscoso de um grau de liberdade, para que assim fosse possível analisar seu desempenho termodinâmico, pois os parâmetros de desempenho do motor a pistão livre estão intrinsicamente ligados e a modificação de um parâmetro de operação acarreta em modificação de algumas variáveis.

Apesar da dificuldade apresentada no controle dinâmico do pistão, existem ferramentas tecnológicas, como o acionamento ativo do motor elétrico linear, que estão rompendo essa barreira e possibilitando o desenvolvimento do FPEG, o que é de grande valia para o ramo automobilístico, pois o modelo analisado se destacou pela eficiência, praticidade e alta capacidade de adaptação.

A possibilidade do modelo em trabalhar em ressonância, eleva sua capacidade de geração de energia em larga escala, de acordo com os resultados obtidos no presente trabalho essa capacidade de operação se mostrou promissora, podendo ser vista com maior rigor em trabalhos futuros. Além disso, o uso do etanol como fonte energética apresentou resultados bastante satisfatórios, chegando a ser mais eficiente energeticamente quando comparado à gasolina.

4.2 Recomendações

De acordo com a conclusão apresentada no capítulo 5.1 alguns temas para trabalhos futuros se mostram promissores, são eles:

- Simulação da variação da carga, através do controle eletrônico do motor elétrico linear;
- Análise de eficiência do FPEG operando em ressonância;

- Estudo da autonomia e viabilidade econômica em veículos híbridos operando com FPEG.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ACHTEN, P. A. A review of free piston engine concepts. SAE transactions, JSTOR, p. 1836–1847, 1994. doi:10.4271/941776.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Petróleo e Derivados. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/petroleo-e-derivados2>>. Acesso em: 19 set. 2021.

AICHLMAYR, H. T. Design considerations, modeling, and analysis of micro-homogeneous charge compression ignition combustion free-piston engines. 2002. Tese de Doutorado. *University of Minnesota*.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 3ª edição, 2008. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 8 outubro 2021.

ARAÚJO, Mariana. Força de Lorentz. Disponível em: http://wikiciencias.casadasciencias.org/wiki/index.php/For%C3%A7a_de_Lorentz. Acesso em 02 de nov de 2021.

BENTO, P. F. Modelo dinâmico e termodinâmico para motor linear de pistão livre. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica 2019. doi:10.14393/ufu.di.2019.339.

BRITO, M. Máquinas CC. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/4136050/aula-13---introdução-maquinas-cc>>. Acesso em 5 de nov de 2021.

BRUNETTI, F. Motores de Combustão Interna. Volume 1. 1ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2013.

ÇENGEL, Yunus A. BOLES, Michael A. Termodinâmica. 5ª Ed. Mcgraw Hill, 2007.

COSTA, P. Produção de hidrocarbonetos líquidos e gasosos por pirólise de resíduos plásticos. Produção de hidrocarbonetos líquidos e gasosos por pirólise de resíduos plásticos, 2006.

EHSANI, M. et al. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, Fundamentals, Theory and Design. [S.l.]: CRC Press, 2005

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Monitorando o Progresso da Eficiência Energética no Brasil – Indicadores e Análises Setoriais. Nota Técnica DEA 025/17. Rio de Janeiro. EPE, 2017.

FERRAZ NETTO, Luiz. Geradores de Energia Elétrica (Conceitos básicos). Feira de Ciências. Disponível em: https://sinproconhecer.sinprolondrina.com.br/wp-content/uploads/2017/08/geradores-de-energia-eletrica_56108.pdf. Acesso em 28 de out 2021.

FRANCHI, C.M. “Acionamentos elétricos”. Ed. Érica, 4a. Ed., SP, 2008. 240 P.

GALDINO, Jean Carlos da Silva. Curso: Manutenção de ferrovia – Eletrotécnica II – 2011. Disponível em: http://www3.ifrn.edu.br/~jeangaldino/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=apostila_grupo_motor_gerador1.pdf. Acesso em 4 de Abril de 2021.

HALLIDAY, DAVID. Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica David Halliday, Robert Resnick, Jean Walker. Rio de Janeiro. LTC. 2013.

HANIPAH, M. Razali; MIKALSEN, R.; ROSKILLY, A. P. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications. Applied Thermal Engineering, v. 75, p. 493-503, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.039>

JIA, B. Analysis and control of a spark ignition free-piston engine generator. Tese (Doutorado) Newcastle University, 2016.

LUZ, M. Apostila de motores de combustão interna. Pelotas, UFPEL, 2013. 19 p.

MARTINS, J. Motores de Combustão Interna. 2. ed. Porto: PUBLINDÚSTRIA EDIÇÕES TÉCNICAS, 2006. 437 P.

MENDONÇA et al. Gerador de Hidrogênio aplicado a Motor a Combustão Interna Ciclo Otto. XV Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia – SEGeT, 2018. Rio de Janeiro, 2018.

MIKALSEN, R. An investigation into the free-piston engine concept and its potential for high efficiency and low emissions power generation. Newcastle University, 2008.

MIKALSEN, R.; JONES, E.; ROSKILLY, A. Predictive piston motion control in a free-piston internal combustion engine. *Applied Energy*, Elsevier, v. 87, n. 5, p. 1722–1728, 2010. doi:10.1016/j.apenergy.2009.11.005.

MIKALSEN, R.; ROSKILLY, A. P. A review of free-piston engine history and applications. *Applied Thermal Engineering*, Elsevier, v. 27, n. 14-15, p. 2339–2352, 2007. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.03.015.

PASSOS, IAN EIRAS VERSIANI. Análise de desempenho de um motor de combustão interna de uma motocicleta com o uso de mistura combustível-hidrogênio [manuscrito] / Ian Eiras Versiani Passos. 2017.

RAIDE, V. RAIDE, V. ILVES, R. KÜÜT, A. KÜÜT, K. and OLT J Existing State of Art of free-piston Engines. *Agronomy Research*, v. 15, n. S1, p. 1204-1222, 2017.

REVOREDO, T. Modelagem e Gerenciamento de Potência de um Veículo Elétrico Híbrido de Célula a combustível. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

RICHARDSON, Roberto Jarry. *Pesquisa social: métodos e técnicas*. São Paulo: Atlas, 1989

SAMPAIO, José Luiz; CALÇADA, Caio Sérgio. *Universo da Física, 2: hidrostática, termologia, óptica*. 2ª ed. São Paulo: Atual, 2005.

SOUZA, Reynaldo Barros de Uma visão sobre o balanço de energia e desempenho em veículos híbridos / Reynaldo Barros de Souza. -- Campinas, SP: [s.n.], 2010. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/264345/1/Souza_ReynaldoBarrosde_M.pdf. Acesso em 28 ago 2021.

SOUZA, REYNALDO BARROS de. Uma visão sobre o balanço de energia e desempenho em veículos híbridos / Reynaldo Barros de Souza. Campinas, SP: [s.n.], 2010.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. E BORGNAKKE, C., *Fundamentos da Termodinâmica*. Tradução da 6ª Edição Americana, E.J. Zerbini, São Paulo: Editora Edigard Blucher Ltda, 2003

TIPLER, PAUL A. Física 1. Rio de Janeiro. LTC. 1976.

WILSON, M. A energia. Rio de Janeiro: José Olympio, 1968. 200p.

XIAO, J.; LI, Q.; HUANG, Z. Motion characteristic of a free piston linear engine. Applied energy, Elsevier, v. 87, n. 4, p. 1288–1294, 2010. doi:10.1016/j.apenergy.2009.07.005.

YINGCONG ZHOU, AIMILIOS SOFIANOPOULOS, BENJAMIN LAWLER AND SOTIRIOS MAMALIS. Advanced combustion free-piston engines: A comprehensive review International J of Engine Research 2020, Vol. 21(7) 1205–1230

ZOU, H., WANG M., TANGA M., Li C., TIAN C. Experimental investigation and performance analysis of a direct-driven linear generator. Energy Procedia, Elsevier, v. 142, p. 284–290, 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.12.045. Citado na página 25

FREE PISTON ENGINE GENERATOR: Technology review and an experimental evaluation with hydrogen fuel. Link: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12239-014-0024-8>

Design considerations, modeling, and analysis of micro-homogeneous charge compression ignition combustion free -piston engines. Link: <https://www.proquest.com/openview/40139928c5c49442f82d61497c2b040f/1?pq-origsite=scholar&cbl=18750&diss=y>

Free-piston engine hydraulic pump for an automotive propulsion system. SAE transactions Link: <https://saemobilus.sae.org/content/880658/> em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala13/13_t02.asp>. Acesso em 5 de Abril de 2016.