

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA**

**ALEX MORAIS DA MATTA
GABRIEL GUIMARÃES DA SILVA
SERGIO GONÇALVES LEITE BODART**

**ANÁLISES DINÂMICA, ENERGÉTICA E ECONÔMICA DE
VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**RIO DE JANEIRO
2019**

**ALEX MORAIS DA MATTA
GABRIEL GUIMARÃES DA SILVA
SERGIO GONÇALVES LEITE BODART**

**ANÁLISES DINÂMICA, ENERGÉTICA E ECONÔMICA DE
VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Ronney Arismel Mancebo Boloy

RIO DE JANEIRO

2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M435 Matta, Alex Morais da.
Análises dinâmica, energética e econômica de veículos elétricos híbridos / Alex Morais da Matta, Gabriel Guimarães da Silva [e] Sergio Gonçalves Leite Bodart – 2019.
ix, 87f. : il. color., grafs., tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2019.
Bibliografia: f. 83-87.
Orientador: Ronney Arismel Mancebo Boly.

1. Engenharia mecânica. 2. Veículos elétricos. 3. Veículos a motor - Aspectos ambientais. 4. Veículos híbridos. 5. Motores elétricos. I. Silva, Gabriel Guimarães da. II. Bodart, Sergio Gonçalves Leite. III. Boly, Ronney Arismel Mancebo (Orient.). IV. Título.

CDD 621

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes CRB-7/5281

RESUMO

Esse trabalho apresentou um estudo dinâmico, energético e econômico sobre veículos elétricos híbridos desenvolvidos nos anos recentes, assim como uma discussão de suas principais categorias, componentes e especificidades. Três diferentes configurações de acionamento de potência, cada qual sendo uma tecnologia própria de veículo híbrido, foram escolhidas para a realização do estudo, classificadas em HEV (*Hybrid Electric Vehicle*) em série, FCHEV (*Full Cell Hybrid Electric Vehicle*) e PHEV (*Plug in Hybrid Electric Vehicle*). Por meio da primeira Lei da termodinâmica é possível analisar a eficiência energética de operação para cada uma das configurações escolhidas; eficiência definida como a relação entre o trabalho mecânico realizado pelo veículo e a energia suprida pela fonte. Para viabilizar a comparação de custo-benefício, foram introduzidos alguns conceitos de finanças e contabilidade, como o cálculo de valor presente descontado. Em seguida, foram avaliadas as taxas de consumo de energia para cada configuração estudada em condições específicas. De posse do consumo médio de energia, do preço dos diferentes insumos, dos custos de manutenção e outros, conseguiu-se determinar a viabilidade da aquisição de cada modelo segundo o método do valor presente descontado. Verificou-se que o modelo à célula combustível (FCHEV), apesar de ser a configuração com maior eficiência (entre 33,1% e 43,3%), é o menos atraente do ponto de vista econômico, dado o alto custo do combustível, em média \$14,00 por kg, aumentando o valor presente descontado, que variou entre R\$ 224.815 e R\$ 249.396. Os modelos HEV em série e PHEV apresentaram pequenas diferenças com relação à eficiência energética; no primeiro a eficiência variou entre 19% e 24,8% enquanto no segundo variou entre 21,3% e 27,7%. Portanto, o segundo mostrou-se mais energeticamente eficiente e economicamente viável comparado com o primeiro, já que os resultados obtidos para o Valor Presente Descontado do HEV em série variaram entre R\$ 187.582 e R\$ 201.209 e para o PHEV entre R\$ 182.035 e R\$ 195.046. Para que as melhorias desejadas no campo da sustentabilidade energética e ambiental sejam atingidas, o uso de veículos híbridos deve ser disseminado em escala considerável. Para tanto, o custo de aquisição destes veículos deve ser suficientemente atraente do ponto de vista do consumidor. A produção em massa pode reduzir o custo dos veículos híbridos ao longo do tempo. Para todos os modelos analisados neste trabalho, as ineficiências dos componentes em série, quando acumuladas, geraram perdas globais consideráveis, sugerindo que pequenas melhorias nos componentes internos podem fazer a diferença ao longo do tempo. Sugere-se que o uso de HEV em série e PHEV possam ser disseminados no setor de transporte, promovendo melhor qualidade de vida à sociedade, no que tange a utilização eficiente destes veículos na mobilidade urbana, bem como uma maior redução de doenças pela minimização das emissões de gases de efeito estufa, atrelada ao desenvolvimento tecnológico e eficiência energética destes veículos.

Palavras-chave: Veículo híbrido. Análise dinâmica. Análise energética. Análise econômica.

ABSTRACT

This paper presented a dynamic, energetic and economic studying about hybrid electric vehicles developed in recent years, as well as a discussion concerning the main categories, components and specifications. Three different power drive configurations, each one being a hybrid vehicle specific technology, are chosen for carrying out of the study, classified as series HEV (Series Hybrid Electric Vehicle), FCHEV (Full Cell Hybrid Electric Vehicle) and PHEV (Plug in Hybrid Electric Vehicle). Through the first Thermodynamics Law, it is possible analyzing the operation energetic efficiency for each one of the chosen configurations; efficiency is defined here as the relationship between the mechanical work performed by the vehicle and the energy supplied by the source. To enable the cost-benefit comparison, some concepts of finance and accounting were introduced, such as discounted present value calculation. Following, the paper assesses the energy consumption rates for each studied configuration under specific conditions. With the average energy consumption, the cost of the different inputs, the maintenance costs and others, the viability of the acquisition of each model was determined according to the discounted present value method. The fuel cell model, despite being the configuration with the higher efficiency (between 33.1% and 43.3%), has been found to be the least economically attractive due the high cost of fuel, about \$14,00/kg, increasing, therefore, the discounted present value, which ranged between R\$ 224,815 and R\$ 249,396. he series HEV and PHEV models showed slight differences regarding energy efficiency; In the former, efficiency ranged from 19% to 24.8% while in the latter, it ranged from 21.3% to 27.7%. Therefore, the second proved to be more energy efficient and economically viable compared to the first, since the results obtained for the discounted present value of the series HEV ranged between R \$ 187,582 and R \$ 201,209 and for the PHEV between R \$ 182,035 and R \$ 195,046. In order for the desired improvements in the field of energy and environmental sustainability to be achieved, the use of hybrid vehicles must be disseminated to a considerable extent. To this end, the cost of purchasing these vehicles must be sufficiently attractive from the consumer's point of view. Mass production can reduce the cost of hybrid vehicles over time. For all models analyzed in this paper, the inefficiencies of serial components, when accumulated, have generated considerable overall losses, suggesting that small improvements in internal components can make a difference over time. It is suggested that the use of serial HEV and PHEV can be disseminated in the transport sector, promoting better quality of life for society, regarding the efficient use of these vehicles in urban mobility, as well as a greater reduction of diseases by minimizing the conditions of transport. greenhouse gas emissions, linked to the technological development and energy efficiency of these vehicles.

Keywords: Hybrid vehicle. Dynamics analysis. Energetic analysis. Economic analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Percurso urbano típico usado em testes de eficiência	18
Figura 2 - Percurso em rodovia típico usado nos testes de eficiência.....	18
Figura 3 - Ponto morto superior e inferior de um motor.....	23
Figura 4 - Carro elétrico General Motors EV1	25
Figura 5 - Disposição dos elementos em um HEV básico.....	26
Figura 6 - Toyota Prius fabricado no ano 1997	26
Figura 7 - Honda Insight fabricado no ano 1999	27
Figura 8 - Configuração do HEV em série.....	28
Figura 9 - Eficiência energética do combustível em função da potência e velocidade de operação	28
Figura 10 - Lohner-Porsche Mixed Hybrid recriado pelo museu Porsche em 2007	29
Figura 11 - Configuração do PHEV	29
Figura 12 - Sonata Hybrid Plug In	30
Figura 13 - Configuração HEV em paralelo.....	30
Figura 14 - Kia Optima Hybrid EX 2020	31
Figura 15 - Configuração do FCHEV.....	31
Figura 16 - Esquema de funcionamento de uma célula combustível	32
Figura 17 - Exemplo de um tanque de armazenamento de hidrogênio.....	34
Figura 18 - Configuração básica de uma bateria eletroquímica	36
Figura 19 - Forças de resistência no veículo.....	42
Figura 20 - Pressão de reação nos pneus para superfícies duras considerando ausência de movimento	43
Figura 21 - Pressão de reação no pneu para (a) superfície dura e (b) superfície macia.....	44
Figura 22 - Exemplo de um trem de força típico.....	47
Figura 23 - Fluxograma do sistema HEV em série, com o volume de controle, entradas e saídas representados.....	54
Figura 24 - Fluxograma do sistema FCHEV, com volume de controle, entradas e saídas representados.....	55
Figura 25 - Fluxograma do sistema PHEV, com volume de controle, entradas e	

saídas representados.....	58
Figura 26 - Eficiência de operação e densidade de potência em conjunto com a densidade de corrente de uma célula combustível à hidrogênio.....	63
Figura 27 - Comparação de eficiência operacional	71
Figura 28 - Eficiência do veículo em função da taxa de uso da bateria	71
Figura 29 - Comparação de custo por km percorrido	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição setorial do consumo de derivados do petróleo	10
Tabela 2 - Número de anos de duração das reservas de petróleo atuais	12
Tabela 3 - Número de anos de duração das reservas de petróleo atuais	13
Tabela 4 - Estimativa sobre recursos não descobertos de petróleo em 2012	14
Tabela 5 - Exemplo de teste de eficiência.....	19
Tabela 6 - Eficiências TTW para alguns tipos de veículo	20
Tabela 7 - Anos que fariam compensar o maior custo inicial de um veículo híbrido através de sua eficiência energética, em função da taxa de juro e do custo da gasolina	21
Tabela 8 - Estimativas de f_r típicos para diferentes condições	44
Tabela 9 - Coeficientes de arrasto para alguns tipos comuns de veículos.....	45
Tabela 10 - Eficiências de cada componente integrante dos sistemas HEV	63
Tabela 11 - Custo anual de manutenção em cada revisão	65
Tabela 12 - Ford Fusion, demanda por potência na roda, kW	66

LISTA DE SIGLAS

BEV	Battery Electric Vehicle
CDP	Custo por Distância Percorrida
EE	Electrical Engine
EPA	Environmental Protection Agency
FC	Fuel Cell
FCHEV	Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle
GEE	Gases do Efeito Estufa
HEV	Hybrid Electric Vehicle
ICE	Internal Combustion Engine
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
RPC	Rodagem por Combustível
TTW	Tank-to-Wheel
VPD	Valor Presente Descontado
WTW	Well-to-Wheel

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.2 MOTIVAÇÃO.....	12
1.2.1 Reservas de Petróleo	12
1.2.2 Efeito Estufa E Mudanças Climáticas.....	14
1.2.3 Poluição Atmosférica	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 ECONOMIA DOS VEÍCULOS HÍBRIDOS	20
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE VEÍCULOS AUTOMOTIVOS.....	22
3.1 TIPOS DE VEÍCULO.....	22
3.1.1 Veículo À Combustão Interna.....	22
3.1.1.1 Motor à combustão interna	22
3.1.2 Veículo Elétrico À Bateria – BEV (Battery Electric Vehicle):	24
3.1.3 Veículo Elétrico Híbrido - HEV (Hybrid Electric Vehicle):	25
3.1.4 HEV Em Série.....	27
3.1.5 Veículo Elétrico Híbrido Plug In – PHEV (Plug In Hybrid Electric Vehicle)	29
3.1.6 HEV Em Paralelo	30
3.1.7 Veículo Elétrico Híbrido À Célula Combustível - FCHEV (Full Cell Hybrid Electric Vehicle)	31
3.1.7.1 Célula Combustível	31
3.1.7.2 Armazenamento de hidrogênio	33
3.1.8 O Sistema Do FCHEV	35
3.2 PRINCIPAIS COMPONENTES	35
3.2.1 Baterias.....	36
3.2.1.1 Bateria chumbo-ácido	36
3.2.1.2 Bateria à base de Níquel.....	37
3.2.1.3 Bateria à base de Lítio	37
3.2.2 Motores Elétricos	37
3.2.3 Gerador.....	38
3.2.4 Conversor De Potência	39
3.2.5 Transmissão.....	40
4 METODOLOGIA.....	41
4.1 REVISÃO TEÓRICA	41
4.1.1 Análise Dinâmica	41
4.1.1.1 Resistência ao rolamento:	43
4.1.1.2 Arrasto aerodinâmico	45
4.1.1.3 Resistência à subida.....	46
4.1.1.4 Força de tração e velocidade do veículo	47
4.1.1.5 Resistência à aceleração.....	48
4.1.1.6 Potência na roda.....	49
4.1.2 Análise Energética	49
4.1.2.1 Balanço de energia	49
4.1.2.2 Rendimentos em série.....	51
4.1.2.3 Percursos energéticos	52
4.1.2.3.1 HEV em série	52

4.1.2.3.2 FCHEV.....	54
4.1.2.3.3 PHEV.....	55
4.1.3 Análise Econômica.....	59
4.1.3.1 Valor presente descontado	59
4.1.3.2 Modelo Econômico.....	60
4.2 ESCOLHA DOS SISTEMAS.....	61
4.3 ESCOLHA DO VEÍCULO	61
4.4 ESCOLHA DO CENÁRIO	61
4.4.1 Eficiências Dos Componentes De Cada Sistema.....	61
4.4.1.1 Condições de contorno da análise energética	62
4.4.1.2 Velocidade de operação e perfil da pista	63
4.4.1.3 Condições de contorno para a análise econômica.....	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	66
5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DINÂMICA.....	66
5.1.1 Cálculo Da Potência De Acionamento Na Roda	66
5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE ENERGÉTICA.....	68
5.2.1 Aplicação Termodinâmica	68
5.2.1.1 Parâmetros.....	68
5.2.1.1.1 HEV em série.....	68
5.2.1.1.2 FCHEV.....	69
5.2.1.1.3 PHEV	69
5.2.2 Comparações De Eficiência	70
5.2.3 Comparações De Custo Com Combustível	72
5.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ECONOMICA	75
5.3.1 Aplicação Econômica	75
5.3.1.1 Parâmetros utilizados.....	75
5.3.1.1.1 HEV em série.....	75
5.3.1.1.2 FCHEV.....	76
5.3.1.1.3 PHEV.....	76
5.3.2 Comparações De Custo-Benefício	77
5.3.2.1 Variando o preço do veículo.....	77
5.3.2.2 Variando o preço do combustível	78
5.4 LIMITAÇÕES E PONTOS POSITIVOS	78
5.4.1 Limitações no Modelo Dinâmico	78
5.4.2 Limitações no Modelo Termodinâmico.....	79
5.4.3 Limitações no Modelo Econômico	79
5.4.4 Pontos Positivos.....	79
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
6.1 PRINCIPAIS RESULTADOS	81
6.2 INTERPRETAÇÃO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS	81
6.3 CONTRIBUIÇÕES DOS RESULTADOS ALCANÇADOS PARA A SOCIEDADE E O MEIO AMBIENTE	81
6.4 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	82
7 BIBLIOGRAFIA	83

1 INTRODUÇÃO

A área de transportes é abastecida essencialmente por combustíveis fósseis, em especial aqueles baseados no petróleo e seus derivados. Esses combustíveis são responsáveis por diversas mudanças ambientais e climáticas. Entre elas, pode ser citado o aquecimento global, a poluição do ar nas cidades, entre outras. O setor de transporte consome quase 55% de toda a energia mundial e responde pela emissão de aproximadamente 30,9% do dióxido de carbono da atmosfera [HIMADRY S. D., 2017]. Levando em conta essa situação, tecnologias menos dependentes do petróleo e seus derivados, ou até mesmo sem dependência alguma, vêm surgindo no cenário global. Entre elas, os carros elétricos híbridos ganham destaque progressivo. Em alguns países, esse tipo de automóvel está sendo usado com maior frequência, como é o caso da Noruega, que possui 23% do total de vendas mundiais de carros elétricos e híbridos, seguida pela Holanda (10%) e Suécia (2%) [M. C. JOSÉ apud OECD/IEA, 2017].

No Brasil, o uso de derivados do petróleo em diversos setores pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição setorial do consumo de derivados do petróleo

Ano	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Total (10 ⁶ toneladas equivalentes de petróleo)	96,6	95,8	105,2	110,4	117,4	121,2	125,8	118,1	112,0	113,5
Consumo na Transformação	4,1%	3,3%	3,6%	3,0%	3,9%	4,8%	6,0%	5,5%	2,8%	2,8%
Centrais Elétricas de Serviço Público	2,9%	2,3%	2,6%	2,0%	2,9%	3,7%	5,1%	4,4%	1,8%	1,8%
Centrais Elétricas Autoprodutoras	1,2%	1,1%	1,0%	1,0%	1,1%	1,1%	1,0%	1,1%	1,0%	1,0%
Consumo Final Energético	82,4%	82,8%	81,7%	83,2%	83,1%	83,1%	82,4%	82,8%	85,1%	85,1%
Setor Energético	4,9%	5,1%	4,9%	4,3%	4,0%	4,4%	4,6%	4,7%	4,2%	4,2%
Residencial	6,3%	6,4%	6,0%	5,8%	5,4%	5,4%	5,2%	5,5%	5,9%	5,8%
Comercial	0,5%	0,3%	0,3%	0,3%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
Público	0,6%	0,6%	0,4%	0,4%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
Agropecuário	6,0%	5,9%	5,6%	5,2%	5,0%	4,9%	4,9%	5,4%	4,7%	4,3%
Transportes	51,3%	51,4%	53,0%	55,6%	57,3%	57,3%	56,9%	56,6%	59,8%	60,6%
Industrial	12,9%	13,0%	11,6%	11,6%	10,7%	10,6%	10,2%	9,9%	9,9%	9,6%
Consumo Não - Identificado	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Consumo Final Não - Energético	13,5%	13,9%	14,7%	13,8%	13,0%	12,1%	11,6%	11,8%	12,0%	12,1%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: Relatório de Minas e Energia, 2018

Na tabela 1 observa-se que, de acordo com dados do relatório de Minas e Energia realizado no ano 2018 sobre a composição setorial do consumo de derivados do petróleo, o consumo final energético que agrega os setores de energia, residencial, comercial, público, agropecuário, transportes, industrial, e consumo não identificado somou 85,1% do consumo total em 2017; dessa totalidade, o setor de transportes foi o que apresentou a maior porcentagem de contribuição no uso de combustíveis fósseis, com 60,6%, exibindo uma variação acima de 10% comparado ao ano de 2008. Por outro lado, os setores público e comercial foram os que apresentaram o menor consumo. Observa-se também que no período entre 2008 e 2017 foram consumidas 1.116.188 toneladas equivalentes de petróleo (tep). Nesse sentido, a substituição dos combustíveis derivados do petróleo apresenta-se como uma opção necessária, possibilitando melhores índices de emissões, bem como melhores parâmetros de desempenho e viabilidade econômica. Portanto, a alternativa tecnológica baseada em veículos elétricos híbridos emerge como solução importante para o setor de transportes.

No Brasil, o uso de veículos elétricos híbridos não é tão difundido quanto em outros países. Em 2018, apenas 3.970 veículos elétricos/híbridos foram licenciados, contra 2.471.395 veículos convencionais, à combustão interna, representando apenas 0,2% do total de veículos licenciados [ANFAVEA, 2019].

Muitos podem ser os motivos para a pouca representatividade dos veículos elétricos híbridos no Brasil, entre eles, o desafio de produzir baterias com maior autonomia pode ser destacado. A bateria é o elemento responsável pela alimentação do motor elétrico, além de fornecer energia aos outros dispositivos eletrônicos. Assim sendo, pode ser classificada como o elemento principal quando se trata de acionamento elétrico. Pesquisas tecnológicas levaram ao desenvolvimento das baterias à base de lítio, que possuem menor peso e maior densidade energética, sendo, conseqüentemente, a melhor tecnologia à disposição no momento.

Apesar dos desafios atuais, veículos elétricos híbridos estão ocupando cada vez mais espaço no cenário automobilístico, trazendo juntamente consigo uma tecnologia capaz de se adaptar aos problemas com os quais a sociedade, como um todo, vem se preocupando progressivamente mais.

Por outro lado, a escolha do tipo de veículo elétrico híbrido pode não ser

uma tarefa tão trivial, uma vez que diversos fatores podem influenciar na avaliação da eficiência energética e viabilidade econômica dos sistemas híbridos.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal analisar dinâmica, energética e economicamente três diferentes configurações de veículos elétricos híbridos, com o intuito de comparar os resultados e destacar o sistema mais vantajoso em termos de eficiência e custo-benefício.

A base de informações para a realização deste trabalho é fruto de pesquisa bibliográfica sobre o tema dos veículos elétricos híbridos, consultando artigos científicos, livros e trabalhos acadêmicos.

1.2 MOTIVAÇÃO

O petróleo é uma fonte não renovável de energia. Seu uso a longo prazo pode ter como consequência o esgotamento dos reservatórios, acontecimento que configura um impacto ambiental negativo, permanente e irreversível [M. V. RODRIGO *et al*, 2010]; além disso, a emissão de gases de efeito estufa (GEE) cresce constantemente com o passar dos anos. Por exemplo, em 1990, 2,5 milhões de toneladas de GEE foram geradas, aumentando para 7 milhões em 2008. No Brasil, esse aumento foi de apenas 11% [A. M. THIAGO *et al*, 2012]. Diante dos fatos expostos, fica evidente que a busca por novas fontes de energia, com o intuito de permitir um avanço tecnológico sustentável, é imprescindível.

Diversos motivos impulsionam o desenvolvimento e pesquisa de energias mais limpas e sustentáveis, entre eles, as consequências mais evidentes do uso de combustíveis fósseis: mudanças climáticas e a poluição atmosférica.

1.2.1 RESERVAS DE PETRÓLEO

Uma estimativa de 2001 da British Petroleum mostra a razão R/P, que representa o número de anos os quais as reservas atuais durariam caso a produção de petróleo permanecesse em seu nível corrente, para cada região do planeta. Essa razão é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 - Número de anos de duração das reservas de petróleo atuais (continua)

Região	Reservas de petróleo no ano 2000 em bilhões de toneladas	Razão R/P
América do Norte	8,5	13,8
América do Sul/Central	13,6	39,0

Tabela 2 - Número de anos de duração das reservas de petróleo atuais (conclusão)

Europa	2,5	7,7
África	10,0	26,8
Oriente Médio	92,5	83,6
Antiga USSR	9,0	22,7
Ásia - Pacífico	6,0	15,9
Total Mundial	142,1	39,9

Fonte: Chris Mi *et al*, 2017

Embora a relação R/P não inclua descobertas futuras, ela é significativa para fins de análise, pois as reservas existentes são as mais acessíveis para a operação. A possibilidade de novas descobertas de petróleo no futuro não é descartada, mas é provável que isso não mude o quadro geral de escassez, além de impor maiores custos de operação. A razão R/P da tabela 2 é baseada na hipótese de que a produção atual permanecerá constante.

Através de equipamentos como gravímetros, magnetômetros, farejadores e sismólogos, os geólogos podem analisar as condições e localizações de bacias sedimentares na camada superficial. O petróleo obtido hoje é facilmente extraído, pois fica próximo à superfície, nas regiões onde o clima não impõe um problema sério, como, por exemplo, nos países do Oriente Médio. Acredita-se que mais petróleo se encontre debaixo da crosta terrestre, em regiões como a Sibéria ou o Ártico americano e canadense. Nessas regiões, as preocupações climáticas e ecológicas são os principais obstáculos para a extração.

Uma estimativa mais recente mostrou que as estimativas podem variar conforme os anos, pois houve aumento nas reservas em relação aos dados apresentados na tabela 2, conforme se observa na tabela 3:

Tabela 3 - Número de anos de duração das reservas de petróleo atuais

Região	Reservas Comprovadas em 2018 em bilhões de toneladas	Razão R/P
América do Norte	35,4	28,7
América do Sul e Central	51,1	136,2
Europa	1,9	11,1
África	16,6	41,9
Oriente Médio	113,2	72,1
Antiga USSR	19,6	27,4
Ásia - Pacífico	6,3	17,1
Total Mundial	244,1	50,0

Fonte: British Petroleum

Apesar desse aumento das reservas mundiais conhecidas, em breve será atingido o ponto em que a tendência é de queda, como é demonstrado para a Europa, região em que houve uma ligeira redução em relação aos dados coletados no fim do ano de 2000.

Dados recentes do U.S Geological Survey, obtidos em 2012, mostram uma estimativa sobre os recursos não descobertos de petróleo, como ilustra a tabela 4. [40]

Tabela 4 - Estimativa sobre recursos não descobertos de petróleo em 2012

Região	Milhões de barris
Oceano Ártico	2,4
Antiga URSS	63,8
Oriente Médio e Norte da África	111,2
Ásia - Pacífico	47,5
Europa	9,9
América do Norte	83,4
América do Sul e Central	125,9
África Subsaariana e Antártida	115,3
Sul da Ásia	5,9

Fonte: U.S. Geological Survey

A exploração de reservas ainda não descobertas, em especial na América do Sul, África e Oriente Médio, pode fornecer uma sobrevida significativa ao uso de combustíveis fósseis. Entretanto, o consumo anual global de combustível está em trajetória ascendente, impulsionado principalmente pelo crescimento das economias emergentes. A exploração de reservas recém descobertas pode ter contribuído para o aumento nas reservas conhecidas, destacado na tabela 3. No entanto, pelo fato de tais recursos proporcionarem uma maior dificuldade na sua retirada e causarem eventuais danos ao meio ambiente, é imprescindível a busca por novos modelos, mais sustentáveis.

1.2.2 EFEITO ESTUFA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A temperatura no planeta Terra é influenciada pela atmosfera, onde o dióxido de carbono (aproximadamente 370 partes por milhão de volume) funciona como um regulador térmico. Porém, a concentração desse gás está aumentando devido à ação humana, que despeja GEE (Gases de Efeito Estufa) na atmosfera,

principalmente por meio da queima de combustíveis fósseis. Essa concentração vem aumentando desde a revolução industrial, acumulando um aumento de 30% até hoje, tendendo a dobrar nos próximos 50 anos; provocando, dessa forma, um aumento de 1 a 2 graus na temperatura do planeta [G. JOSÉ, 2000].

No Brasil, a queima de combustíveis fósseis é responsável por 25% das emissões de GEE na atmosfera [C. C. CARLOS *et al*], contribuindo significativamente para agravar a poluição atmosférica. Essa porcentagem poderia ser reduzida com a introdução de uma maior quantidade de veículos elétricos híbridos na logística de mobilidade urbana.

Acredita-se, inclusive, que o efeito estufa e as mudanças climáticas tenham induzido fenômenos meteorológicos como o El Niño, que perturba a região do Pacífico Sul, e regularmente causa tornados, inundações e secas. O derretimento de calotas polares, outro grande resultado do aquecimento global, eleva o nível do mar e pode causar inundações permanentes de regiões costeiras.

1.2.3 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A poluição atmosférica pode ser definida como a presença de compostos em concentrações anormais na atmosfera, podendo ser provenientes da ação humana ou natural, em concentrações capazes de afetar a saúde dos seres vivos [E. D. C. JOSÉ *et al*, 2006].

Além do dióxido de carbono e água, os produtos de combustão liberam uma certa quantidade de óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados, todos tóxicos para a saúde.

As altas temperaturas e pressões no motor criam condições favoráveis para a formação de óxidos de nitrogênio. O óxido de nitrogênio mais comumente encontrado é o óxido nítrico (NO), embora pequenas quantidades de dióxido de nitrogênio (NO_2) e vestígios de óxido nitroso (N_2O) estejam presentes. O NO_2 é parcialmente responsável pela poluição atmosférica, pois também reage com a água da atmosfera para formar o ácido nítrico (HNO_3) que se dilui na chuva, fenômeno conhecido como chuva ácida.

Estudos mostram a correlação entre os gases emitidos pela utilização de combustíveis fósseis e a degradação da saúde humana. Em oito comunidades suíças, constatou-se que com o aumento da concentração de dióxido de

nitrogênio e dióxido de enxofre, a função pulmonar de adultos foi reduzida. De forma semelhante, em comunidades do Canadá e Estados Unidos, foram constatados sinais de bronquite em crianças, proporcionais à concentração de partículas finas [E. D. C. JOSÉ *et al*, 2006].

Para países como o Brasil, que dispõem de uma matriz energética de origem predominantemente renovável (com destaque para a fonte hídrica, sendo esta responsável por 65,2% da oferta interna segundo o relatório do Ministério de Minas e Energia realizado em 2018) torna-se vantajoso o uso de frotas de veículos elétricos híbridos ou veículos elétricos, dado que a geração primária de eletricidade vem de uma fonte limpa. O impacto ambiental acarretado é menor em comparação a outros países, como a Alemanha, em que grande parte de sua energia provém do uso do carvão.

A utilização de veículos puramente elétricos em relação aos motores de combustão interna seria uma forma de diminuir a poluição proveniente do setor dos transportes, considerando que este tipo de veículo é composto por menos peças internas, logo, menos peças de reposição são necessárias para a manutenção, além de menos energia ser utilizada para a fabricação dos materiais. Porém, isso só poderia ser efetivo se as baterias tivessem uma forma sustentável de reciclagem após o final de seu ciclo de vida.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na literatura sobre veículos em geral, há duas métricas de eficiência usadas de maneira abrangente:

a) Eficiência *Tank-to-Wheel* (TTW)

Representa a parcela da energia química abastecida através do tanque de combustível do veículo que chega às rodas na forma de potência mecânica para movê-lo.

b) Eficiência *Well-to-wheel* (WTW)

Abrange para além da eficiência TTW, as eficiências anteriores na cadeia de obtenção do combustível, sendo, portanto, uma métrica de eficiência total, da extração primária do combustível à roda do veículo.

As análises desde trabalho se concentrarão na eficiência TTW dos veículos HEV em série, PHEV e FCHEV. O primeiro obstáculo ao cálculo da eficiência operacional de um veículo, seja TTW ou WTW, reside no fato de que a taxa instantânea de aproveitamento energético depende da velocidade escolhida. Forças como as de rolamento e arrasto que serão tratadas mais adiante, além das próprias eficiências dos componentes do sistema, como o motor à combustão, variam em função da velocidade do veículo, tornando impossível o cálculo de consumo energético para o deslocamento sabendo-se apenas dois pontos quaisquer. É necessário criar um percurso padrão, no qual a velocidade do veículo seja definida em função do tempo, para então obter alguma eficiência compatível com esse percurso.

Por esse motivo, uma série de procedimentos experimentais foi padronizada para medir diversos parâmetros, incluso eficiência TTW. Na figura 1 está representado um percurso urbano padrão produzido pela EPA (Environmental Protection Agency), a agência de proteção ambiental dos Estados Unidos, para testes de eficiência energética em veículos automotores:

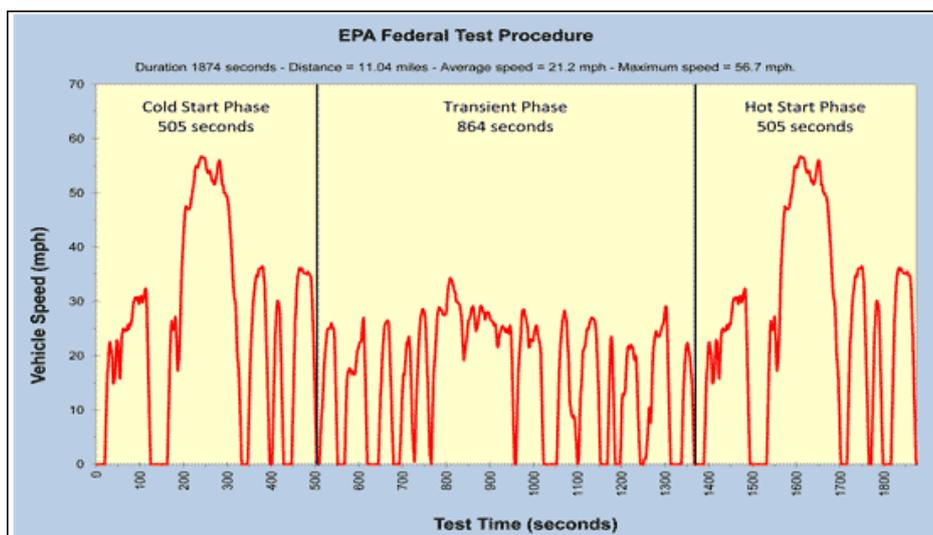


Figura 1 - Percurso urbano típico usado em testes de eficiência
 Fonte: disponível em fuelconomy.gov

O trajeto urbano, caracterizado por inúmeras paradas, acelerações e desacelerações, destoa bastante do trajeto em rodovia, como fica evidente observando a figura 2.

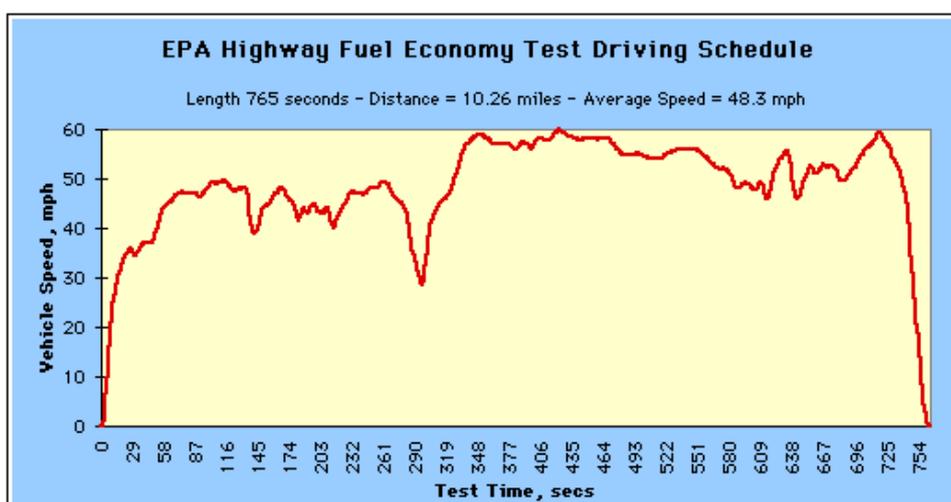


Figura 2 - Percurso em rodovia típico usado nos testes de eficiência
 Fonte: disponível em fuelconomy.gov

É possível observar que durante o percurso não existem paradas, visto que a velocidade do veículo é zero apenas no início o no final do trajeto.

O cálculo de eficiências e de consumo de combustível para um ciclo combinado de utilização considera uma multiplicidade de parâmetros, como verificados na tabela 5, adaptada do departamento de energia dos Estados Unidos.

Tabela 5 - Exemplo de teste de eficiência

Atributos	Ciclo de teste				
	Cidade	Rodovia	Alta velocidade	A/C	Baixa temperatura
Tipo de trajeto	Baixas velocidades em ciclos urbanos com diversas paradas	Livre fluxo à velocidade da rodovia	Altas velocidades, acelerações e desacelerações expressivas	Uso do ar condicionado em ambientes quentes	Teste na cidade com baixa temperatura externa
Velocidade máxima	56 mph	60 mph	80 mph	54.8 mph	56 mph
Velocidade média	21,2 mph	48,3 mph	48,4 mph	21,2 mph	21,2 mph
Aceleração máxima	3,3 mph/s	3,2 mph/s	8,46 mph/s	5,1 mph/s	3,3 mph/s
Distância simulada	11 mi	10,3 mi	8 mi	3,6 mi	11 mi
Tempo	31,2 min	12,75 min	9,9 min	9,9 min	31,2 min
Paradas	23	Nenhum	4	5	23
Tempo de inatividade	18% do tempo	Nenhum	7% do tempo	19% do tempo	18% do tempo
Partida do motor	Frio	Morno	Morno	Morno	Frio
Temp. do laboratório	68°F–86°F	68°F–86°F	68°F–86°F	95°F	20°F
Ar condicionado	Desligado	Desligado	Desligado	Ligado	Desligado

Fonte: adaptado de fueleconomy.gov

A tabela 5 apresenta informações de funcionamento, como velocidade máxima e partida do motor, de acordo com o trajeto percorrido pelo veículo. A partir dessas informações, é possível modelar a eficiência de um veículo, como será apresentado neste trabalho.

Dadas as dificuldades teóricas envolvidas no processo, a aferição da eficiência TTW nos veículos costuma ser feita em testes empíricos. A tabela 6 mostra uma variedade de eficiências esperadas para algumas combinações de veículos, abrangendo desde os ICEV, HEV de todos os tipos (em série, paralelo, plugin, etc.), FCHEV e BEV. Com exceção do FCHEV, que foi obtido em uma simulação numérica para a mesma combinação de percursos dos demais segundo a norma utilizada pela EPA [N. BRINKMAN et al, 2005], todos os outros advêm de testes compilados pelo site de Economia de Combustível (*Fuel Economy*) dos Estados Unidos a partir de testes padronizados em veículos reais.

Tabela 6 - Eficiências TTW para alguns tipos de veículo

Veículos	Eficiência TTW	Fonte
Combustão interna	12% - 30%	F.E
Híbridos	21% - 40%	F.E
Célula Combustível (H2)	43% *	Brinkman et al.
Elétricos puros	72% - 94%	F.E

* Estimativa numérica

Essa breve revisão na literatura fornece uma faixa de eficiências operacionais (TTW) esperadas, que poderão ser utilizadas como parâmetro para comparar os resultados ao longo deste trabalho. O custo associado à locomoção do veículo, entretanto, é de difícil comparação, dado que os preços e as taxas de câmbio usadas nos artigos internacionais estão sujeitas a flutuações ao longo do tempo. Além disso, a comparação de custos exige a determinação da demanda por potência em função das condições de acionamento (velocidade, aceleração, inclinação da via), requerendo, deste modo, a utilização de um trajeto padronizado; o que impossibilita a comparação para as condições simplificadas que foram arbitradas no presente trabalho.

2.1 ECONOMIA DOS VEÍCULOS HÍBRIDOS

A análise da adoção de um veículo do ponto de vista do consumidor é fundamental para estudar a disseminação da tecnologia nos próximos anos. Sabe-se que, dados os custos associados à compra, manutenção e abastecimento de veículos híbridos em meados dos anos 2000, sua popularização seria improvável (M. E. CANES, 2006). Devido ao aprendizado na produção dos veículos híbridos e dos seus insumos de utilização, estudos recentes mostram-se mais otimistas quanto à viabilidade da tecnologia. Assumindo o custo da gasolina e a taxa de juro como parâmetros exógenos, é possível estimar o tempo de utilização de um veículo híbrido que compensaria o maior custo inicial de aquisição, dada certa economia operacional dependente do preço da gasolina e da taxa de juro em vigor [J. ARSHAD et al, 2014], como se pode observar na tabela 7.

Tabela 7 - Anos que fariam compensar o maior custo inicial de um veículo híbrido através de sua eficiência energética, em função da taxa de juro e do custo da gasolina

Taxa de juro em % ao ano	Custo da gasolina em \$ por galão								
	\$ 2,00	\$ 2,50	\$ 3,00	\$ 3,50	\$ 4,00	\$ 4,50	\$ 5,00	\$ 5,50	\$ 6,00
0%	13,39	9,91	8,26	7,08	6,19	5,51	4,96	4,51	4,13
1%	13,29	10,49	8,66	7,38	6,43	5,69	5,11	4,63	4,24
2%	14,38	11,16	9,12	7,71	6,68	5,89	5,27	4,77	4,35
3%	15,72	11,94	9,63	8,08	6,96	6,11	5,45	4,91	4,48
4%	17,54	12,87	10,23	8,49	7,26	6,34	5,63	5,07	4,60
5%	19,80	14,03	10,92	8,96	7,60	6,60	5,84	5,23	4,74
6%	23,34	15,50	11,74	9,49	7,98	6,88	6,06	5,41	4,89
7%	29,84	17,49	12,76	10,11	8,40	7,20	6,30	5,60	5,04
8%	61,37	20,46	14,05	10,86	8,89	7,55	6,56	5,81	5,21

Fonte: adaptado de ARSHAD et al. (2014)

O procedimento usual para avaliar o custo-benefício de um veículo híbrido em relação a outro (híbrido ou não) consiste em trazer os custos iniciais e operacionais a valor presente com uma ferramenta contábil chamada Valor Presente Descontado (ou Valor Presente Líquido). Este tópico será tratado mais adiante.

Já a adoção e disseminação de veículos à célula combustível seguem sendo um tópico de maior complexidade, dependendo criticamente da evolução das tecnologias associadas à manufatura dos veículos híbridos, produção do hidrogênio veicular e desenvolvimento da infraestrutura de abastecimento nas próximas décadas [J. M. OGDEN, 2018]. Hoje, o fator que dificulta a utilização ampla de veículos à célula combustível é o alto custo do hidrogênio.

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE VEÍCULOS AUTOMOTIVOS

A fundamentação teórica a seguir tem o objetivo de estabelecer as bases necessárias para a compreensão da análise e discussão de resultados posteriores.

3.1 TIPOS DE VEÍCULO

3.1.1 VEÍCULO À COMBUSTÃO INTERNA

Os veículos à combustão interna, ou ICEV (Internal Combustion Engine Vehicle), funcionam com base no princípio da combustão, que é composta de três fontes principais: calor, oxigênio e combustível [A. O. CARLOS *et al*, 2003]. Tradicionalmente, o combustível alimentado ao ICEV é a gasolina ou diesel, ambos derivados do petróleo. Porém, atualmente, existem diversos tipos de biocombustíveis que podem substituí-los nesse processo, a exemplo do álcool, do biodiesel, biometano e biohidrogênio.

O oxigênio, fornecido pelo ar, cuja concentração na atmosfera terrestre é por volta de 21% [DEPARTAMENTO DE FÍSICA DA UFPR], é utilizado como elemento oxidante importante para a produção de calor através da ignição do combustível.

3.1.1.1 Motor à combustão interna

O motor é basicamente um conjunto de peças mecânicas, que se aproveita da expansão do ar e do aumento de pressão, gerados pela combustão do combustível no interior dos cilindros, com o objetivo de gerar trabalho, que no caso dos veículos, se traduz em movimento. Ou seja, o motor à combustão interna é uma máquina térmica que transforma a energia química contida nos combustíveis em calor, e posteriormente em energia mecânica [T. A. T. VITOR, 2017].

Os motores são classificados de acordo com o ciclo termodinâmico no qual são baseados. Esses ciclos são, resumidamente, sequências de processos que se repetem ao longo do tempo.

Existem dois tipos principais de motores à combustão interna, que são o motor à combustão interna com ignição por centelha e o motor com ignição por compressão, sendo o primeiro mais adequado para uso em automóveis devido ao baixo custo e relativa leveza, e o segundo preferível em aplicações em que se necessita de economia de combustível e potência relativamente alta, como, por

exemplo, para caminhões, ônibus e locomotivas [J. M. MICHAEL, 2013]. Neste trabalho, foi considerada apenas a utilização do motor à combustão interna com ignição por centelha, definido pelo ciclo Otto.

O ciclo de funcionamento do motor pode ser dividido nas seguintes etapas:

1 - Admissão: essa fase é iniciada com o pistão posicionado no ponto morto superior (PMS). Com a válvula de admissão aberta, o pistão executa um curso de admissão quando aspira uma carga fresca para dentro do cilindro. O pistão movimenta-se em direção ao ponto morto inferior (PMI), onde o volume no interior do cilindro é máximo [T. A. T. VITOR, 2017]. O PMS e o PMI são mostrados na Figura 3.

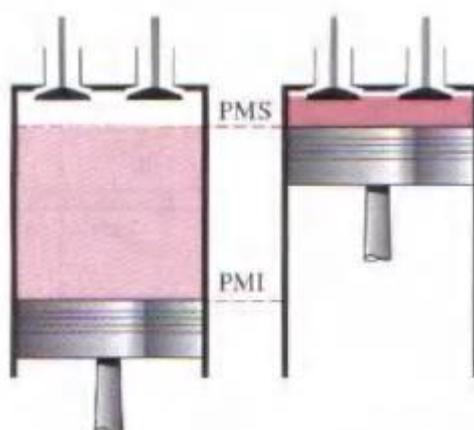


Figura 3 - Ponto morto superior e inferior de um motor
Fonte: [ÇENGEL, 2013]

No caso de motores com ignição por centelha, a carga é uma mistura de ar e combustível que é aspirado devido à baixa pressão [J. M. MICHAEL *et al*, 2013].

2 - Compressão: com ambas as válvulas fechadas, o pistão passa por um curso de compressão movendo-se do PMI em direção ao PMS, elevando a temperatura e a pressão da carga. Esta fase exige fornecimento de trabalho do pistão para o conteúdo do cilindro. Inicia-se então um processo de combustão, que resulta em uma mistura gasosa de alta pressão e alta temperatura. A combustão é induzida através da vela próxima ao final do curso de compressão nos motores com ignição por centelha [J. M. MICHAEL *et al*, 2013].

3 - Expansão (explosão): Um curso de potência após o curso de

compressão, durante o qual a mistura gasosa aumenta a pressão na câmara com a expansão e é realizado trabalho sobre o pistão à medida que este retorna ao PMI [J. M. MICHAEL *et al*, 2013].

4 - Escape (expulsão): Por último, com o pistão no PMI e o cilindro cheio de gases provenientes da combustão, a válvula de escape é aberta e o pistão sobe em direção ao PMS. No trajeto, o pistão empurra e expelle os gases da combustão para fora do cilindro. Ao atingir o PMS, a válvula de admissão é aberta e o ciclo recomeça com outra admissão [T. A. T. VITOR, 2017].

3.1.2 VEÍCULO ELÉTRICO À BATERIA – BEV (BATTERY ELECTRIC VEHICLE):

Os primeiros carros elétricos surgiram no final do século XIX, visando substituir as carruagens movidas a cavalo, que eram o principal meio de transporte à época. Entretanto, devido a sua reduzida autonomia, que não ultrapassava 16 km com velocidade máxima de 15 km/h [CHRIS MI *et al*, 2017], esse tipo de transporte não conseguiu suprir a demanda necessitada. Além disso, após a fabricação em massa dos ICEV, os BEV se tornaram uma tecnologia inviável, principalmente quando sua autonomia era comparada com os ICEV, que se destacavam pela capacidade de viajar longas distâncias.

Ainda no início do século XX, os ICEV dominaram completamente o mercado de veículos automotores. Entretanto, os impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana, derivados da liberação de gases poluentes no processo de combustão, começaram a se tornar um problema. Nos Estados Unidos, Califórnia, durante a década de 1990, havia o incômodo da poluição e fumaça devido ao grande volume de ICEV operando nas cidades. Em virtude da pressão governamental, grandes fabricantes de veículos iniciaram a produção em massa de novos modelos BEV. Alguns modelos que se destacaram na época foram o GM EV1, apresentado na figura 4, o Toyota RAV4 e o Ford Ranger.



Figura 4 - Carro elétrico General Motors EV1
Fonte: Página da Web “Medium”

Entretanto, o novo mercado de veículos elétricos não prosperou por muito tempo em consequência de sua baixa aceitação entre os consumidores. Alguns fatores contribuíram para este cenário, dentre eles, pode-se destacar a mesma dificuldade observada no final do século XIX e início do século XX, referente à baixa autonomia que veículos deste tipo possuíam. Além disso, devido ao baixo custo da gasolina à época, os ICEV geravam maior economia quando comparados aos BEV; que além de acarretarem em maiores despesas com abastecimento, chegavam a ter seu custo de aquisição 40% maior que os ICEV semelhantes. Ainda há de se considerar que a tecnologia das baterias não teve o desenvolvimento necessário até essa data, exigindo que o veículo fosse carregado por longos períodos de tempo, que poderiam atingir 8 horas [CHRIS MI *et al*, 2017].

3.1.3 VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO - HEV (HYBRID ELECTRIC VEHICLE):

A ideia de um veículo elétrico híbrido movido tanto à energia elétrica quanto à combustão interna surgiu no início dos anos 1900, período em que o veículo elétrico à bateria não conseguia obter sucesso no mercado. Na figura 5 está exemplificada a configuração básica de um veículo elétrico híbrido. A primeira categoria de HEV introduzida ao grande público com sucesso pela indústria automobilística, no entanto, é recente.

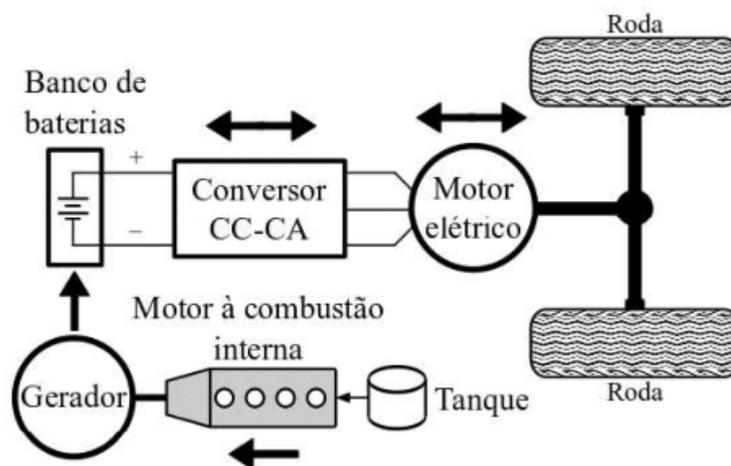


Figura 5 - Disposição dos elementos em um HEV básico
 Fonte: Mayer, Robson, 2016

Foram o Toyota Prius, de 1997, e o Honda Insight, de 1999, nas figuras 6 e 7, respectivamente. Esses veículos possuem motores à combustão interna comuns, mas são dotados de baterias e motores elétricos que aliviam ou substituem temporariamente o trabalho do motor principal (no caso do sistema em paralelo), aumentando a eficiência e reduzindo o consumo de combustível. Já no sistema em série, anteriormente apresentado na figura 5, o motor à combustão apenas fornece potência para o gerador.



Figura 6 - Toyota Prius fabricado no ano 1997
 Fonte: Blog Toyota



Figura 7 - Honda Insight fabricado no ano 1999
Fonte: Página da Honda

Atualmente, com o desenvolvimento da tecnologia das baterias, é possível obter uma maior autonomia com diferentes combinações de arquitetura no sistema híbrido. Existem diferentes tipos de HEV, que serão melhor detalhados a seguir.

3.1.4 HEV EM SÉRIE

O HEV em série é semelhante ao BEV. Possui um motor elétrico que é o único responsável pela tração do veículo, podendo ainda existir mais de um motor elétrico para este fim. A grande evolução deste modelo em comparação com o BEV é o aumento da autonomia, que sempre foi um dos maiores problemas para os veículos elétricos à bateria. Esse aumento de autonomia se deve à presença de um motor à combustão interna, que é acoplado a um gerador, sendo responsável apenas por gerar eletricidade para alimentar o motor elétrico [B. S. REYNALDO, 2010]. Ou seja, o motor à combustão interna não participa no fornecimento de tração ao veículo. Uma representação desta configuração pode ser vista na figura 8.

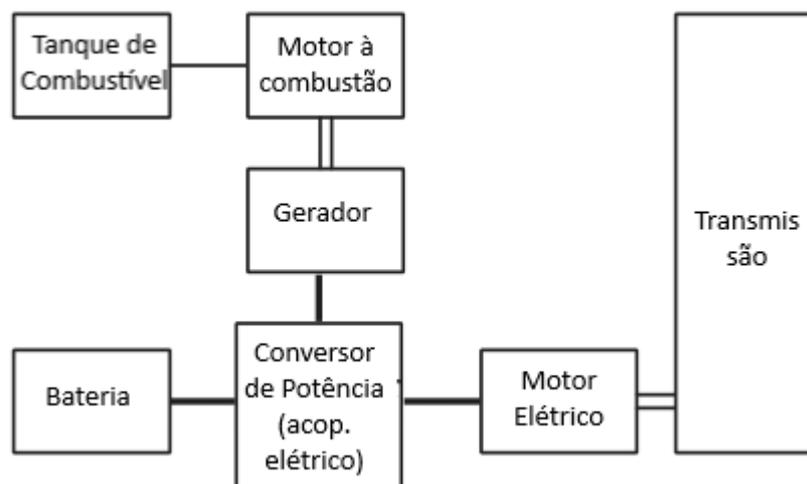


Figura 8 - Configuração do HEV em série
Fonte: Ehsani, Mehrdad, 2018

O primeiro HEV em série construído foi idealizado por Ferdinand Porsche no início do século XX, e foi chamado de *Lohner-Porsche Mixed Hybrid*. Por estar acoplado diretamente ao gerador, o motor à combustão interna pode ser operado na região em que a combinação de potência e velocidades de rotação resultam no melhor aproveitamento energético possível do combustível, como pode ser visto na figura 9.

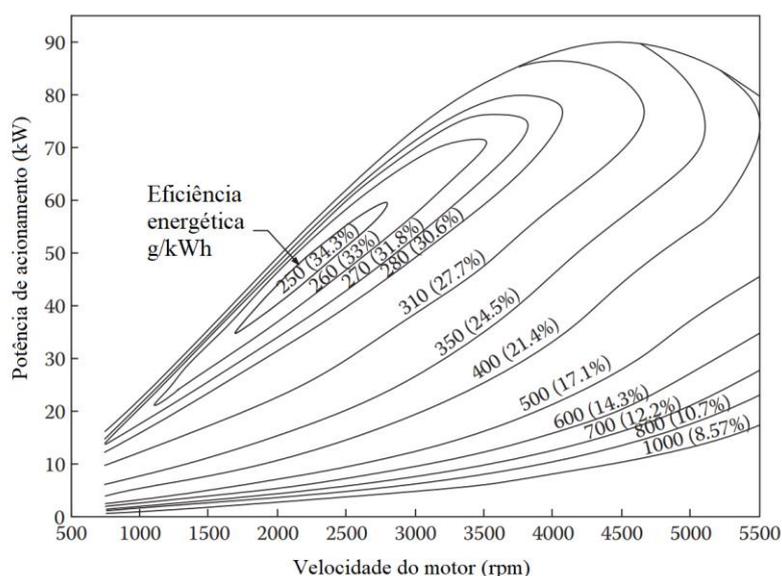


Figura 9 - Eficiência energética do combustível em função da potência e velocidade de operação
Fonte: Ehsani, Mehrdad, 2018

A economia de combustível, na configuração HEV em série, deriva da faixa de operação em que motor à combustão é operado.

Na figura 10, é apresentado o mesmo modelo criado inicialmente por

Porsche no início do século XX, recriado pelo Museu Porsche, em 2007.



Figura 10 - Lohner-Porsche Mixed Hybrid recriado pelo museu Porsche em 2007

3.1.5 VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO PLUG IN – PHEV (PLUG IN HYBRID ELECTRIC VEHICLE)

Esta configuração é muito semelhante ao HEV em série, uma vez que toda a tração é fornecida pelo motor elétrico, como pode ser visto na figura 11. Também é caracterizada por possuir uma bateria e um motor elétrico acoplado a um gerador para recarregá-la. A diferença essencial desse modelo é a capacidade de recarga da bateria diretamente através da rede elétrica, fornecendo, dessa maneira, maior autonomia, além de uma economia de combustível pelo motor à combustão, que passará a fornecer potência em conjunto com a bateria.

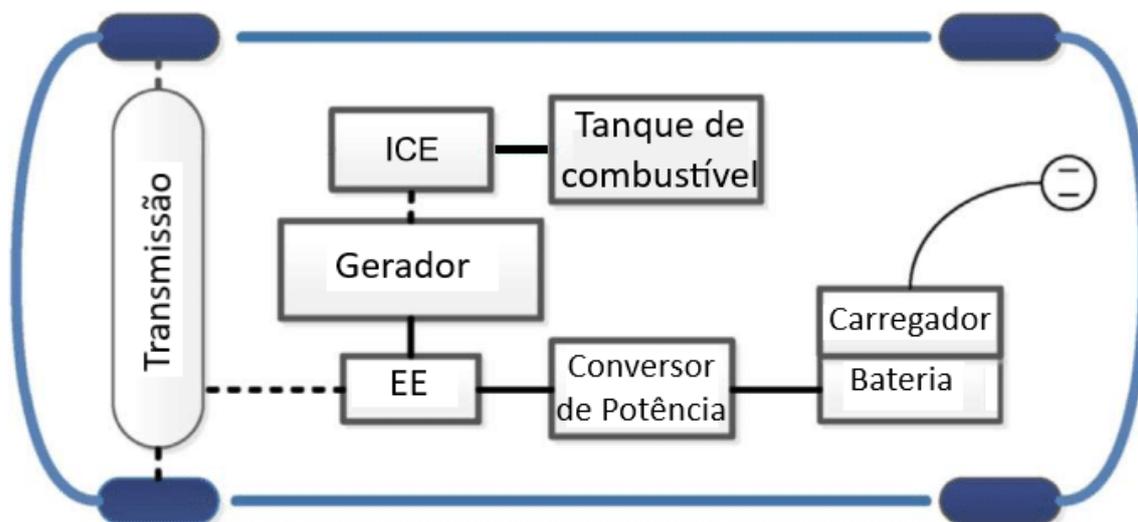


Figura 11 - Configuração do PHEV
Fonte: S.D. Himadry. 2017

Um exemplo do PHEV pode ser visto na figura 12, o Sonata Hybrid Plug In, fabricado pela Hyundai, que especifica um consumo de aproximadamente 16 quilômetros por litro de combustível.



Figura 12 - Sonata Hybrid Plug In
Fonte: Página da Hyundai

3.1.6 HEV EM PARALELO

O modelo em paralelo, visto na figura 13, é caracterizado pelo fato de que tanto o motor elétrico quanto o motor à combustão interna fornecem tração às rodas. Sua vantagem é que esse sistema pode ser mais compacto, já que não é necessária a presença de um gerador, como no sistema em série. A bateria pode ser recarregada pelo próprio motor elétrico, quando o carro estiver, por exemplo, em um declive, ou por regeneração através dos freios. O grande desafio é ajustar o controle do acoplamento simultâneo entre os motores, onde a velocidade e o torque necessários de cada motor devem ser precisamente orientados pelo controlador eletrônico [EHSANI, MEHRDAD *et al*, 2018].

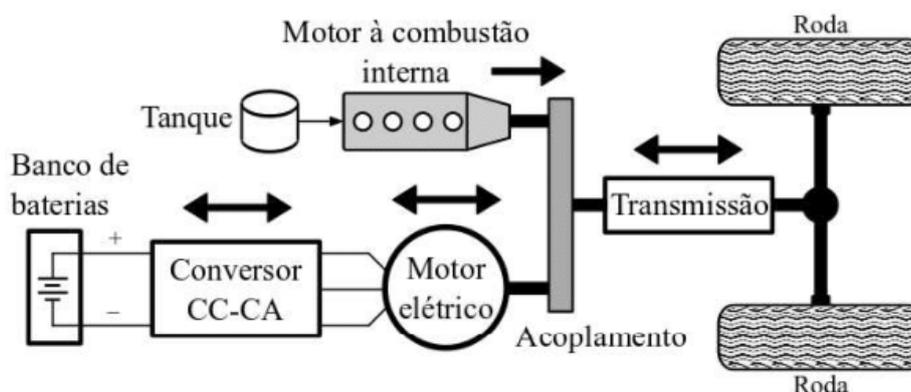


Figura 13 - Configuração HEV em paralelo
Fonte: Mayer, Robson *et al*, 2016

Um exemplo desta configuração é o Optima Hybrid EX, fabricado pela Kia, ilustrado na figura 14. Seu consumo é especificado como aproximadamente 18 quilômetros por litro [Página da Kya].



Figura 14 - Kia Optima Hybrid EX 2020
Fonte: Página da Kya

3.1.7 VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO À CÉLULA COMBUSTÍVEL - FCHEV (FULL CELL HYBRID ELECTRIC VEHICLE)

O sistema FCHEV é similar ao HEV em série. Sua diferença fundamental é a presença de uma célula combustível, que exerce a função de gerar energia elétrica para a bateria. Sua configuração é representada na figura 15.

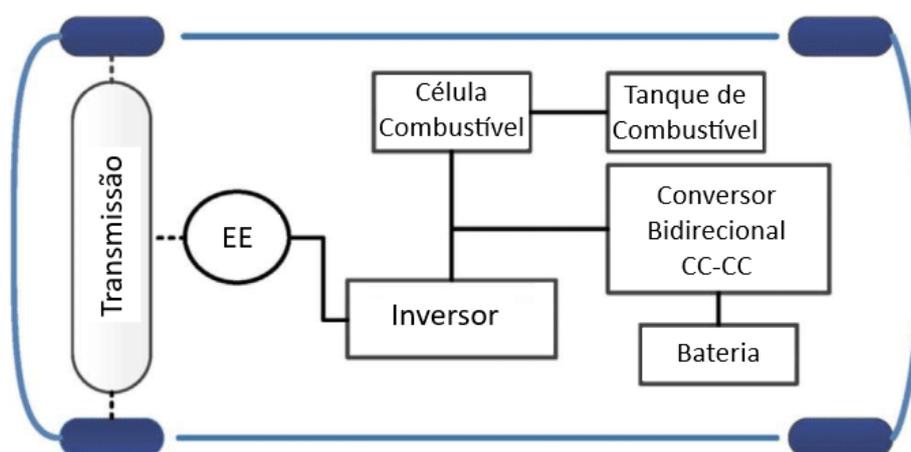


Figura 15 - Configuração do FCHEV
Fonte: S. D. Himadry et al, 2017

Antes do aprofundamento sobre cada tipo de FCHEV, faz-se necessária uma breve abordagem sobre o funcionamento de um dispositivo à célula combustível.

3.1.7.1 Célula Combustível

A célula combustível, que também pode ser considerada uma célula galvânica, é caracterizada por converter a energia química de um combustível, o hidrogênio, em energia elétrica, sem a necessidade de outras transformações de

energia, por meio de processos eletroquímicos. É similar ao funcionamento de uma bateria química, e é necessária a presença de oxigênio para que os processos de oxidação ocorram. Um esquema básico do processo de funcionamento de uma célula combustível é representado na figura 16, em que o combustível e o agente oxidante são continuamente e separadamente supridos aos dois eletrodos da célula, onde os mesmos promovem uma reação. O combustível é suprido ao eletrodo positivo, onde os elétrons são liberados do mesmo por meio de um catalisador. Devido à diferença de potencial entre os dois eletrodos, os elétrons fluem através do circuito externo para o eletrodo negativo, onde a combinação de íons positivos e oxigênio produz uma reação. Segundo Merhdad [EHSANI, MEHRDAD *et al*, 2018] existem diversos tipos de célula combustível, classificadas pelos diferentes tipos de eletrólitos.

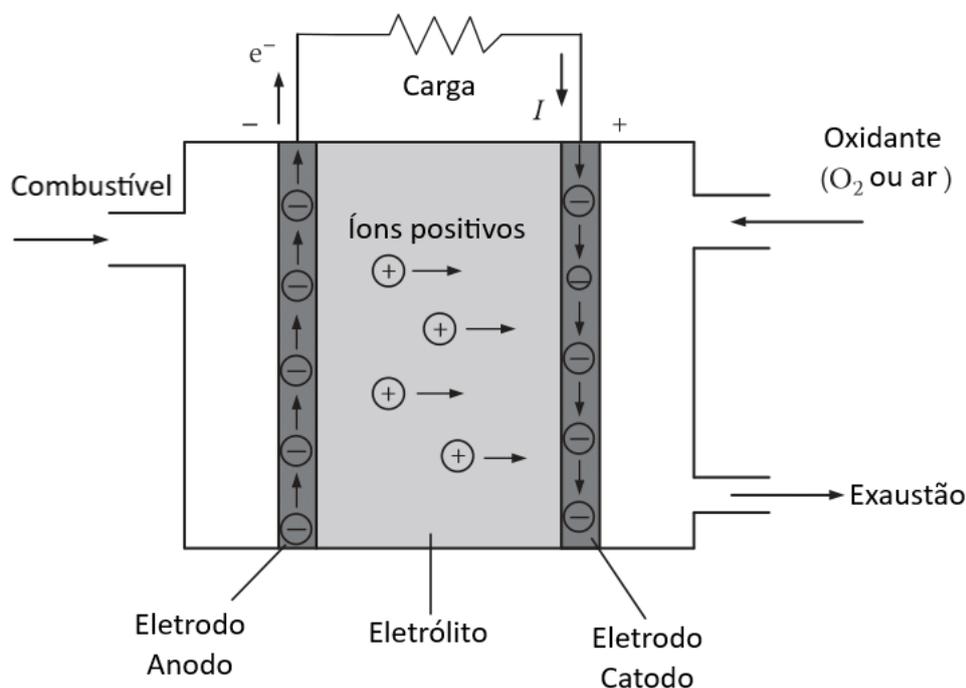


Figura 16 - Esquema de funcionamento de uma célula combustível
Fonte: Ehsani, Mehrdad *et al*, 2018

A célula combustível de membrana de troca de próton é alimentada por hidrogênio puro e oxigênio, e usa membrana de polímero sólida como eletrólito. É o tipo mais utilizado em carros elétricos e híbridos, considerando algumas de suas vantagens, como a temperatura de operação baixa (60°C a 100°C) e alta densidade de potência, tendo como consequência um tamanho reduzido quando comparada com outras células combustível.

Já a célula combustível alcalina usa uma solução aquosa de hidróxido de potássio como eletrólito. Sua faixa de temperatura de operação é baixa, porém é mais elevada (80°C a 230°C) que a célula anteriormente citada. Outra importante característica tem relação com o custo de operação reduzido, já que seu eletrólito e catalizador são mais baratos, conseguindo manter uma alta eficiência. Entretanto, possui a desvantagem de durabilidade, devido ao seu eletrólito corrosivo, além de um de seus produtos ser o dióxido de carbono, que é também um subproduto dos motores à combustão interna e um dos principais motivos pelo qual se busca fontes de energia alternativas.

A célula combustível de ácido fosfórico se baseia em eletrólitos ácidos. É semelhante à célula combustível de membrana de troca de próton, porém precisa de um controle de temperatura de eletrólito maior, uma vez que o eletrólito de ácido fosfórico deve ser mantido abaixo de 42°C. Além disso, possui uma temperatura de operação mais elevada, logo, o combustível precisa ser usado para aquecer o sistema antes do seu funcionamento, resultando numa redução de eficiência. Devido às suas desvantagens, não é geralmente utilizada em veículos.

Existem outros modelos de célula combustível, contudo, não são viáveis para o uso em veículos devido a sua alta faixa de temperatura de operação, que pode chegar a 1200°C, ou devido a sua baixa eficiência.

3.1.7.2 Armazenamento de hidrogênio

Como mencionado anteriormente, o hidrogênio é o combustível ideal para a célula combustível, uma vez que os subprodutos de sua reação são menos poluentes que os produtos dos combustíveis derivados do petróleo. Porém, seu armazenamento é a maior dificuldade desse tipo de produção de energia. Adicionalmente, a produção de hidrogênio pode ser feita em estações e posteriormente armazenado no tanque do veículo, ou pode ser produzido diretamente no veículo.

Os principais métodos de armazenamento são por hidrogênio comprimido, hidrogênio líquido criogênico e hidretos metálicos.

O hidrogênio comprimido é armazenado em um tanque no interior do veículo à alta pressão. Sua principal desvantagem é a perda de energia utilizada apenas para comprimir o hidrogênio, além do problema de se utilizar um gás pressurizado, podendo haver risco de vazamentos ou até de explosões [CHRIS MI

et al, 2017]. Um exemplo de um tanque de armazenamento desse tipo é representado na figura 17 pela seta vermelha, que mostra o Toyota Mirrai, que é um FCHEV, com um corte para mostrar em detalhes seus componentes.



**Figura 17 - Exemplo de um tanque de armazenamento de hidrogênio.
Fonte: Página “Carro Elétrico”**

Outra desafiadora opção é a utilização de hidrogênio líquido, já que para mantê-lo liquefeito é necessária uma temperatura de $-259,2^{\circ}\text{C}$. O projeto do tanque deve ser feito cuidadosamente, já que além de ser necessário evitar a troca de calor com o ambiente, cuidados com vazamentos devem ser extremamente valorizados, levando em conta que o hidrogênio é composto de moléculas pequenas, que podem permear através das paredes do tanque, gerando uma mistura explosiva com o ar atmosférico [CHRIS MI *et al, 2017*].

A terceira opção é a utilização de hidretos metálicos, que são metais combinados com hidrogênio, formando compostos estáveis e armazenáveis, para posteriormente serem decompostos e o hidrogênio possa ser utilizado. Geralmente, essas ligas metálicas possuem a capacidade de armazenar maiores densidades de hidrogênio do que o hidrogênio puro. O desafio nessa modalidade é a fabricação desses hidretos, que elevam o custo inicial do veículo e, após o uso

e posterior descarte dos mesmos, sua reciclagem pode gerar um problema ambiental que deve ser cuidadosamente controlado [CHRIS MI *et al*, 2017 e EHSANI, MEHRDAD *et al*, 2018].

3.1.8 O SISTEMA DO FCHEV

O sistema FCHEV se assemelha ao BEV pelo fato de todo seu funcionamento ter base elétrica, sendo a fonte de eletricidade a célula combustível citada anteriormente. Esse sistema é, por outro lado, também semelhante ao HEV em série, uma vez que a tração é completamente fornecida por um motor elétrico, e no lugar do motor a combustão interna, existe a célula combustível alimentada por hidrogênio.

As vantagens da utilização desse tipo de sistema podem ser resumidas em uma eficiência maior, quando comparado com outros tipos de sistemas, além de uma emissão de poluentes próxima de zero, já que ao final do processo, apenas água e calor são liberados [S. D. HIMADRY *et al*, 2017].

A célula combustível mais adequada para uso em automóveis é a de membrana de troca de próton, uma vez que, como supracitado, a mesma fornece alta densidade de potência, baixa corrosão e temperatura reduzida na faixa de operação.

Mesmo com a vantagem de emissões de poluentes próximas a zero, o alto custo do FCHEV é um grande impeditivo para os consumidores, já que tanto os materiais utilizados, como eletrólitos, quanto o desenvolvimento da tecnologia para armazenar hidrogênio, elevam o custo de aquisição deste veículo.

3.2 PRINCIPAIS COMPONENTES

Alguns elementos presentes nos veículos elétricos híbridos já foram anteriormente citados, a exemplo da célula combustível e do motor à combustão interna. Contudo, com a finalidade de um maior entendimento sobre o funcionamento do sistema em sua totalidade, se faz necessária uma breve discussão sobre a função de cada elemento, bem como seus princípios de funcionamento.

3.2.1 BATERIAS

As baterias, ou baterias eletroquímicas, são dispositivos de armazenamento, em que no processo de carregamento transforma energia elétrica em energia química potencial, que posteriormente é transformada em energia elétrica no processo de descarregamento. Uma bateria é composta por diversas células, que em conjunto formam o módulo, em que diversos módulos conectados em série e/ou paralelo formam a bateria. Sua base de funcionamento consiste em dois eletrodos, um positivo e outro negativo, imersos em um eletrólito, onde elétrons são gerados através da reação química do metal com o ácido e fluem para o eletrodo negativo devido à diferença de potencial gerada, como pode ser visto na figura 18 [CHRIS MI *et al*, 2017; EHSANI, MEHRDAD *et al*, 2018; e P. R. V. V. OSCAR *et al*, 2010].

Existem diversos tipos de bateria, com diferentes categorias e capacidades. Entre elas, é possível destacar 3 tipos principais: chumbo-ácido, à base de níquel e à base de lítio.

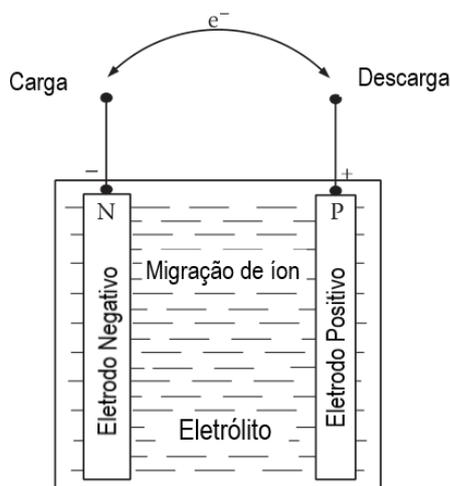


Figura 18 - Configuração básica de uma bateria eletroquímica
Fonte: Ehsani, Mehrdad *et al*, 2018

3.2.1.1 Bateria chumbo-ácido

Desde o século XX, esse tipo de bateria tem sido utilizado em diversos tipos de aplicações, e é amplamente empregado no campo automotivo, tanto para dar partida no motor, quanto para fornecimento de carga auxiliar, já que seu custo é baixo e há capacidade de alta potência, sendo essa uma característica importante para os carros elétricos.

A bateria é composta de um eletrodo de chumbo e outro de dióxido de

chumbo. No processo de descarga, o eletrólito e o material ativo são usados, formando água e sulfato de chumbo; em contrapartida, no processo de carregamento, energia elétrica é absorvida, provocando o consumo de água e sulfato de chumbo, tendo como produto o material ativo e o eletrólito.

3.2.1.2 Bateria à base de Níquel

O Níquel é um metal que, além de ser mais leve que o chumbo, tem boas propriedades eletroquímicas. Por esse motivo, baterias à base de níquel são amplamente utilizadas nos HEV. Entretanto, com o desenvolvimento das baterias a base de Lítio, a referida bateria está caindo em desuso.

Existem quatro diferentes categorias de bateria à base de Níquel: Níquel-Ferro, Níquel-Zinco, Níquel-Cádmio e Níquel-MH (hidreto metálico).

3.2.1.3 Bateria à base de Lítio

O Lítio é o metal mais leve entre os metais, além de possuir boas características eletroquímicas para o uso em baterias. Possui a vantagem de proporcionar altas tensões, tendo como consequência potência e energia específicas altas.

A referida bateria possui dois eletrodos, como na chumbo-ácido, sendo que eles são feitos de óxido de cobalto lítio e carbono.

Mesmo tendo um custo mais elevado que as baterias chumbo-ácido, vantagens diferenciais tornam esse tipo de bateria mais atrativa para o uso em HEV. Possuem a característica de não perder sua capacidade de armazenamento de energia máxima, como ocorre com outros tipos de bateria, devido a reversibilidade da reação de intercalação do lítio, além de apresentarem uma taxa de descarga menor, o que implica em um aumento do período de utilização [CHRIS MI *et al*, 2017 e EHSANI, MEHRDAD *et al*, 2018].

3.2.2 MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico é o componente vital dos HEV. É através dele que acontece a transformação de energia elétrica em energia mecânica, que será utilizada para movimentar o veículo. Adicionalmente, ele também pode gerar eletricidade para recarregar a bateria, durante a frenagem ou movimentação

através de um declive.

Existem diferentes classes de motores elétricos, e sua escolha depende de diversos fatores, que incluem fonte de energia, aceleração, potência e até preferências do consumidor. As classes que se destacam para a utilização em HEV são os motores de corrente contínua, motores de indução e os motores de ímã permanente.

Os motores de corrente contínua são empregados para operações de parada constante, e em casos onde são frequentemente necessárias a frenagem e a rotação inversa do motor. Ou seja, são motores ideais para a aplicação em BEV e HEV, uma vez que possuem uma tecnologia bem conhecida e um controle simples. Seu princípio de funcionamento se deve à passagem de uma corrente elétrica através de uma bobina, que é colocada em um campo magnético, gerando uma força magnética perpendicular à mesma.

Já os motores de indução oferecem algumas vantagens em relação ao motor de corrente contínua com relação a utilização em HEV. Atualmente, é o motor elétrico com a tecnologia mais bem desenvolvida, além de ter um menor peso, menor volume, baixo custo e alta eficiência. Usualmente, um inversor é utilizado para aplicações de tração, de forma a controlar o torque necessário para certas condições de acionamento relacionadas à velocidade do veículo.

Grande parte dos veículos movidos à eletricidade possuem o motor com ímã permanente, devido a sua alta eficiência, tamanho reduzido e alto torque a baixas velocidades [CHRIS MI *et al*, 2017 e EHSANI, MEHRDAD *et al*, 2018].

3.2.3 GERADOR

No trem de força dos HEV, um gerador elétrico está acoplado ao eixo de um motor à combustão interna para processar toda ou uma determinada fração da potência de tração exigida pelas rodas do veículo.

Em uma configuração em série, o motor de combustão interna deve estar ligado e operar com um torque e velocidade quase constantes, apenas quando o armazenamento de energia precisar de uma potência de recarga substancial. Por outro lado, em uma configuração em paralelo, o motor à combustão interna seria operado para fornecer a maior parte da potência de tração solicitada por altas cargas do trem de força, e que provavelmente seria desligado sempre que o

veículo se movimentar em velocidades relativamente baixas e/ou constantes. Baseado nas considerações acima, reconhece-se que a arquitetura específica do sistema de transmissão, sendo considerada por dada aplicação do veículo, influencia substancialmente os requisitos do projeto do gerador elétrico utilizado nos HEV.

O conjunto gerador-ICE (*Internal Combustion Engine*) é dedicado a fornecer a potência média solicitada pelo ciclo de percurso, enquanto o armazenamento de energia da bateria lida com os fluxos de energia de pico bidirecional resultantes do veículo em operação. Na realidade, o grupo gerador-ICE seria ativado sempre que for necessária potência para recarregar a bateria, e para esse objetivo, ele seria operado apenas em pontos selecionados de torque e velocidade de acordo com a estratégia de controle dedicada a minimizar as emissões do motor. Portanto, além da alta compactação, o projeto do gerador deve ser especificado para alcançar o máximo possível de valores de eficiência para os pontos de operação do gerador em que o motor produz emissões mínimas [C. FABIO *et al*].

3.2.4 CONVERSOR DE POTÊNCIA

O conversor de potência é o componente que administra a energia gerada pelo trem de força, que é basicamente um transformador inteligente responsável pelo controle do funcionamento de todo o sistema motriz.

O conversor possui quatro funções:

- a primeira é transformar a corrente contínua da bateria em corrente alternada para ser consumida pelos motores elétricos;
- a segunda é coordenar a entrada do motor à combustão, propulsionar o veículo ou, em determinados regimes de funcionamento, carregar a bateria de tração;
- a terceira é pilotar a regeneração de energia cinética da frenagem do carro em corrente elétrica;
- a quarta é suprir as tarefas do gerador e do motor de partida. Ou seja, é o componente responsável tanto por carregar a bateria convencional quanto por dar a partida no motor a combustão.

O inversor/conversor precisa controlar etapas de potência com tensões e

correntes muito elevadas, por isso é uma peça pesada e robusta. Como a geração de calor também é alta, tanto o inversor/conversor como os motores geradores possuem um sistema de arrefecimento exclusivo, com bomba d'água elétrica, radiador e reservatórios próprios.

3.2.5 TRANSMISSÃO

A transmissão do veículo regula a transferência de potência (torque e velocidade) da fonte de potência (motor principal) ao sistema de direção e às rodas. No caso de HEV, a transmissão se torna ainda mais complexa do que em veículos convencionais ou elétricos com dois ou mais motores principais (entradas) e uma saída para a linha de direção/rodas.

O sistema de transmissão desempenha um papel importante na determinação da força de tração, no consumo de combustível e na regulação de energia em todo o sistema. O torque e velocidade de rotação do eixo de saída da fonte de potência são transmitidos para as rodas motrizes através da embreagem ou conversor de torque, caixa de marchas, transmissão final, diferencial e eixo de acionamento.

A transmissão consiste basicamente de uma caixa de marchas (conjunto de trens de engrenagens com diferentes relações de transmissão) e um dispositivo de interrupção de energia (mecanismo de embreagem) que pode ser acionado mecanicamente, eletricamente ou hidraulicamente. Os requisitos de transmissão de um veículo dependem das características da fonte de potência e requisitos de desempenho do veículo [EHSANI, MEHRDAD *et al*, 2018].

4 METODOLOGIA

As análises dinâmica, energética e econômica exigem a revisão e introdução de alguns conceitos de mecânica, termodinâmica e contabilidade. Este capítulo tratará cada um dos respectivos tópicos de forma simplificada, fornecendo uma estrutura analítica a ser desenvolvida e aplicada nos capítulos posteriores.

4.1 REVISÃO TEÓRICA

4.1.1 ANÁLISE DINÂMICA

Para analisar a eficiência energética do veículo, é necessário ter um modelo dinâmico que relacione a potência de saída do motor à sua velocidade/aceleração em determinado instante de tempo. Neste item serão desenvolvidas as equações necessárias para definir a potência requerida (potência de acionamento na roda) em função de uma série de parâmetros, como massa do veículo, inclinação da pista, velocidade, aceleração, etc.

Segundo Mehrdad *et al*, a aceleração do veículo pode ser determinada pela segunda lei de Newton, na forma:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\psi M} \quad (1)$$

Onde V é a velocidade do veículo, $\sum F_t$ e $\sum F_r$ o somatório das forças trativas e de resistência que atuam sobre ele, respectivamente, M sua massa total e ψ o fator de massa que converte, de modo equivalente, os momentos angulares dos componentes rotativos em inércia translacional correspondente.

As forças de resistência ao movimento do veículo incluem as forças de resistência ao rolamento dos pneus, mostradas na figura 19, como os torques T_{rf} e T_{rr} , a força de arrasto aerodinâmico, F_W , e a força de resistência à subida ao plano inclinado, $Mg\sin(\alpha)$.

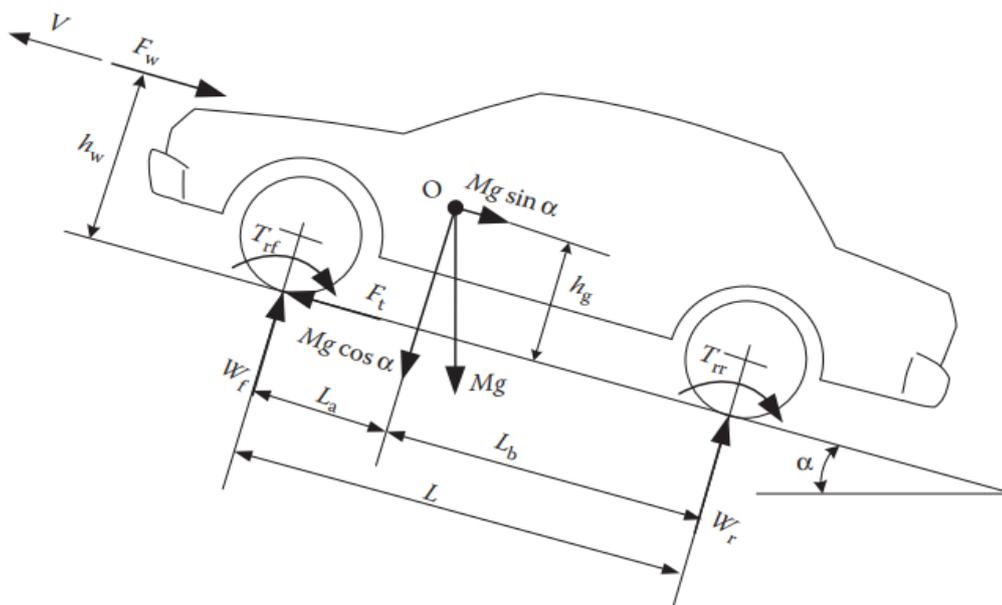


Figura 19 - Forças de resistência no veículo
 Fonte: Ehsani, Mehrdad *et al*, 2018

Variáveis da figura 19:

V = velocidade do veículo

F_w = força de arrasto;

h_w = distância perpendicular ao solo entre a pista e o centro de aplicação da força de arrasto;

T_{rf} = torque de resistência ao rolamento na roda dianteira;

T_{rr} = torque de resistência ao rolamento na roda traseira;

Mg = força peso;

α = ângulo de inclinação da via;

$Mg \sin \alpha$ = componente vetorial da força peso paralela ao solo;

$Mg \cos \alpha$ = componente vetorial da força peso perpendicular ao solo;

h_g = distância perpendicular ao solo entre o centro de massa do veículo e a pista;

W_f = força de reação normal na roda dianteira;

W_r = força de reação normal na roda traseira;

F_t = força de tração;

L = distância entre os eixos do veículo;

L_a = distância entre o eixo dianteiro e o centro de massa do veículo;

L_b = distância entre o eixo traseiro e o centro de massa do veículo.

4.1.1.1 Resistência ao rolamento:

Na ausência de movimento, a pressão de reação nos pneus é distribuída simetricamente em relação à linha de centro, fazendo com que a força resultante, P_z , se cancele com a carga P aplicada verticalmente no eixo da roda. Para superfícies duras, como a ilustrada na figura 20, a deformação z corresponde à deformação do pneu, enquanto para superfícies macias, z corresponde à deformação do pneu e, principalmente, à deformação do solo.

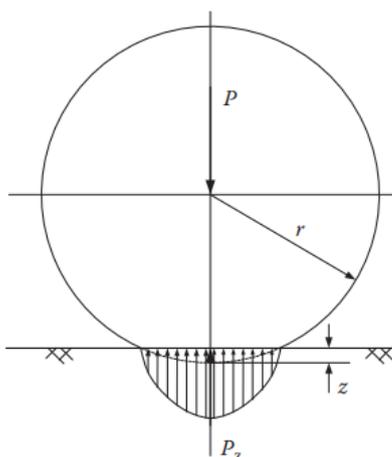


Figura 20 - Pressão de reação nos pneus para superfícies duras considerando ausência de movimento

Fonte: Ehsani, Mehrdad *et al*, 2018

Com o veículo em movimento, a histerese nos materiais do pneu faz com que a pressão de reação na roda seja aplicada assimetricamente em relação ao centro (figura 21), gerando um torque contrário ao movimento, T_r . A magnitude de T_r depende do braço de alavanca a gerado entre o centro de aplicação da pressão nos pneus e da carga P , de modo que:

$$T_r = Pa \quad (2)$$

Para manter a roda girando em velocidade constante, uma força F agindo no centro da roda é necessária para compensar a resistência ao rolamento, que pode ser expressa por:

$$F = \frac{T_r}{r_d} = P \frac{a}{r_d} = P f_r \quad (3)$$

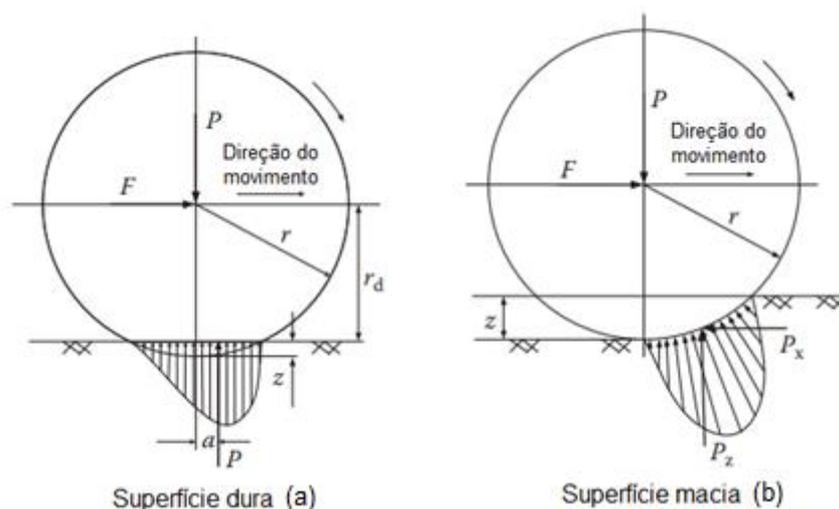


Figura 21 - Pressão de reação no pneu para (a) superfície dura e (b) superfície macia
 Fonte: Ehsani, Mehrdad *et al*, 2018

Onde r_d é o raio efetivo da roda e f_r o coeficiente de resistência ao rolamento, definido como a relação $\frac{a}{r_d}$. Quando o veículo se move sobre uma rodovia inclinada, a carga normal P deve ser substituída por um componente perpendicular à superfície:

$$F_r = P f_r \cos(\alpha) \quad (4)$$

O coeficiente de resistência f_r depende da geometria, materiais e pressão de calibração do pneu; geometria, materiais e rugosidade do solo; além da presença ou ausência de líquidos. Na tabela 8 estão algumas estimativas de f_r típicos para diferentes condições:

Tabela 8 - Estimativas de f_r típicos para diferentes condições

Condições	Coeficiente de Resistência ao Rolamento
Pneus de Carro sobre estrada asfaltada ou concreto	0,013
Pneus de Carro sobre estrada de cascalhos	0,02
Estrada de Macadame	0,025
Estrada despavimentada	0,05
Campo	0,1-0,35
Pneu de Caminhão sobre estrada asfaltada ou concreto	0,006-0,01
Pneu sobre trilho de ferro	0,001-0,002

Fonte: Ehsani, Mehrdad *et al*, 2018

Os valores da tabela 8 não levam em conta o efeito da velocidade no

coeficiente de resistência ao rolamento. Os resultados experimentais coletados ao longo dos anos motivaram o desenvolvimento de diversas fórmulas para estimar f_r em função da velocidade. Segundo Merhda *et al*, a seguinte equação pode ser usada para um veículo de passageiros sobre rodovia de concreto nas classes mais comuns de pressão no pneu, com precisão satisfatória até 128 km/h:

$$f_r = 0,01 \left(1 + \frac{V_{km/h}}{160} \right) \quad (5)$$

Convertendo-se a velocidade para m/s:

$$f_r = 0,01 \left(1 + \frac{3,6V}{160} \right) \quad (6)$$

4.1.1.2 Arrasto aerodinâmico

Um veículo em operação é submetido à força de arrasto F_w dos ventos na direção oposta ao seu movimento. O valor de F_w em determinado instante depende da velocidade do veículo, V , sua área frontal, A_f , da densidade do ar, ρ , do coeficiente de arrasto C_D ; e por fim, da velocidade do vento relativa ao veículo, V_w :

$$F_w = \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V - V_w)^2 \quad (7)$$

Os coeficientes de arrasto para alguns tipos comuns de veículos estão expostos na tabela 9.

Tabela 9 - Coeficientes de arrasto para alguns tipos comuns de veículos (continua)

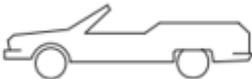
Tipo de Veículo	Coeficiente de arrasto
	0,5...0,7
	0,5...0,7

Tabela 9 - Coeficientes de arrasto para alguns tipos comuns de veículos (conclusão)

	Ponton (Primeiro Mercedes-Benz)	0,4...0,55
	Carroceria com formato de cunha; faróis e pára-choques estão integrados a carroceria, parte inferior da carroceria coberta, fluxo de ar de refrigeração otimizado	0,3...0,4
	Faróis e rodas na carroceria, parte inferior da carroceria coberta	0,2...0,25
	Formato em K (Pequena seção separada)	0,23
	Design de fluxo otimizado	0,15...0,20
Caminhões, Rodotrens		0,8...1,5
Ônibus		0,6...0,7
<i>Streamlined buses</i>		0,3...0,4
Motocicletas		0,6...0,7

Fonte: Ehsani, Mehrdad *et al*, 2018

4.1.1.3 Resistência à subida

A inclinação da rodovia, que pode ser vista na figura 19, cria um componente do peso na direção do movimento, em sentido contrário, cuja força de resistência pode ser expressa como:

$$F_g = Mg \sin(\alpha) \quad (8)$$

Para simplificar os cálculos, é comum fazer aproximações que valem para ângulos pequenos, como:

$$\sin(\alpha) \approx \tan(\alpha) = \frac{H}{S} = i \quad (9)$$

Onde H e S são, respectivamente, os catetos oposto e adjacente de um triângulo retângulo semelhante à via inclinada, sendo i a tangente deste ângulo. Na literatura, é comum combinar a força de resistência ao rolamento, F_r , com a força de resistência à subida, F_g , em um componente chamado resistência à estrada, F_{rd} :

$$F_{rd} = F_r + F_g = Mg(f_r \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) \quad (10)$$

Onde $Mg = P$.

Para ângulos pequenos, $\cos(\alpha) \approx 1$, $\sin(\alpha) \approx i$, logo:

$$F_{rd} = Mg(f_r + i) \quad (11)$$

4.1.1.4 Força de tração e velocidade do veículo

O trem-de-força é o conjunto de componentes responsáveis por gerar e transportar a potência mecânica até o solo para realizar tração do veículo. Na figura 22, tem-se um trem de força típico.

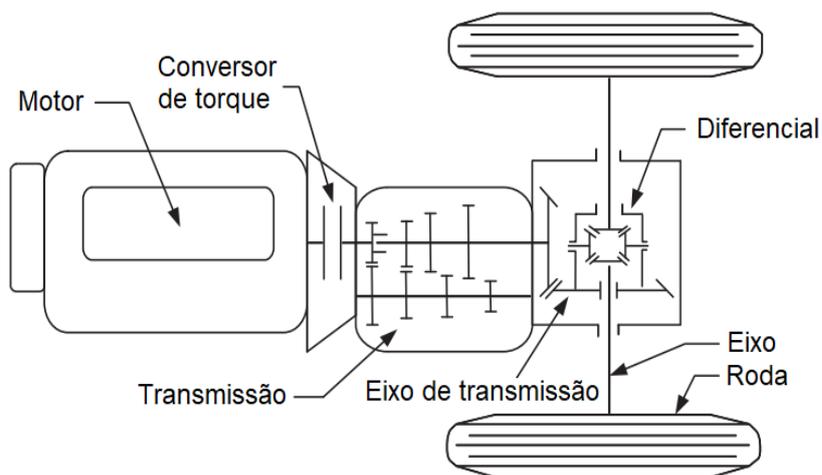


Figura 22 - Exemplo de um trem de força típico
 Fonte: Ehsani, Mehrdad et al, 2018

O torque na roda, T_w , pode ser expresso como:

$$T_w = i_g i_0 \eta_t T_p \quad (12)$$

Onde i_g é a relação de transmissão na caixa de marcha, i_0 a relação de transmissão no diferencial, η_t a eficiência de transmissão e T_p o torque na saída do motor. A força trativa na roda pode ser expressa por:

$$F_t = \frac{T_w}{r_d} \quad (13)$$

Substituindo 12 em 13:

$$F_t = \frac{i_g i_0 \eta_t T_p}{r_d} \quad (14)$$

4.1.1.5 Resistência à aceleração

Como explicitado na equação 1, a aceleração do veículo pode ser obtida pela segunda lei de Newton, onde:

$$\sum F_t - \sum F_r = F_t - F_{rd} - F_w \quad (15)$$

Logo:

$$\psi M \frac{dV}{dt} = F_t - F_{rd} - F_w \quad (16)$$

$$F_t = F_{rd} + F_w + \psi M \frac{dV}{dt} \quad (17)$$

O termo $\psi M \frac{dV}{dt}$ representa a força necessária para acelerar um veículo de massa M em $\frac{dV}{dt}$. O fator de massa ψ expressa o aumento equivalente da inércia do veículo causada pelo aumento dos momentos angulares dos componentes rotativos em seu interior. Segundo Mehrdad *et al*, o fator de massa de um carro de passageiro pode ser estimado pela seguinte relação empírica:

$$\psi = 1 + \psi_1 + \psi_2 i_g^2 i_0^2 \quad (18)$$

Onde ψ_1 e ψ_2 podem ser razoavelmente assumidos como 0,04 e 0,0025 [Mehrdad *et al*, 2018].

4.1.1.6 Potência na roda

Para encontrar o consumo de potência na roda ($P_{\acute{u}til}$), multiplica-se a força trativa F_t na roda pela velocidade do veículo ($P = FV$). Ou seja:

$$P_{\acute{u}til} = V \left(F_{rd} + F_w + \psi M \frac{dV}{dt} \right) \quad (19)$$

Substituindo F_{rd} e F_w :

$$P_{\acute{u}til} = V \left(M \left(g(f_r + i) + \psi \frac{dV}{dt} \right) + \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V - V_w)^2 \right) \quad (20)$$

Substituindo f_r e ψ , pode-se encontrar a taxa instantânea de consumo de potência no eixo da roda em função de todas as variáveis tratadas até aqui:

$$P_{\acute{u}til} = V \left(M \left(g \left(0,01 \left(1 + \frac{3,6V}{160} \right) + i \right) + (1 + \psi_1 + \psi_2 i_g^2 i_0^2) \frac{dV}{dt} \right) + \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V - V_w)^2 \right) \quad (21)$$

4.1.2 ANÁLISE ENERGÉTICA

4.1.2.1 Balanço de energia

Definindo-se o volume de controle como será visto mais adiante, o balanço de energia do sistema exigirá que a soma das energias de entrada seja igual a soma das energias de saída mais a variação da energia do sistema [VAN WYLEN *et al*]. O balanço de energia se exprime como:

$$E_{ent} = \Delta_{SIS} + E_{sai} \quad (22)$$

As energias de entrada no veículo representam a energia química adicionada pelo combustível (gasolina, hidrogênio) e a energia elétrica adicionada diretamente pela rede para o veículo plug-in, em forma de calor. Com o veículo em operação, toda energia que entra deve ser igual a energia que sai, portanto $\Delta_{SIS} =$

0. Ou seja:

$$E_{ent} = E_{sai} \quad (23)$$

A energia de saída se divide entre a energia útil de trabalho usada pelo motor do veículo, W , e a energia não útil gerada ao longo dos processos de conversão, E_{NU} . Para fins de simplificação de análise, a parcela da energia usada para manter funções periféricas (painel, farol, etc) não será levada em conta. Assim sendo:

$$E_{sai} = W + E_{NU} \quad (24)$$

$$W + E_{NU} = E_{ent} \quad (25)$$

Dividindo por Δt :

$$\frac{W}{\Delta t} + \frac{E_{NU}}{\Delta t} = \frac{E_{ent}}{\Delta t} \quad (26)$$

Analisando a expressão acima no limite quando $\Delta t \rightarrow 0$:

$$\frac{dW}{dt} + \frac{dE_{NU}}{dt} = \frac{dE_{ent}}{dt} \quad (27)$$

$$P_{\acute{u}til} + \frac{dE_{NU}}{dt} = \frac{dE_{ent}}{dt} \quad (28)$$

Onde $P_{\acute{u}til}$ é a potência útil de operação na roda.

A eficiência desse processo termodinâmico é definida como:

$$efici\^encia = \frac{sa\acute{ida\ desejada}}{entrada\ necess\^aria} \quad (29)$$

Ou seja:

$$\eta_{GV} = \frac{P_{\acute{u}til}}{\frac{dE_{ent}}{dt}} \quad (30)$$

Onde η_{GV} é a eficiência global do veículo.

A energia que entra no sistema pode ser representada pela taxa de entrada de energia do combustível, $\frac{dE_C}{dt}$, e da bateria, $\frac{dE_B}{dt}$. Ou Seja:

$$\frac{dE_{ent}}{dt} = \frac{dE_C}{dt} + \frac{dE_B}{dt} \quad (31)$$

A queima do combustível consiste na liberação de sua energia química, $\frac{dE_C}{dt} = k\dot{m}$, onde k é o poder calorífico do combustível e \dot{m} a vazão mássica. A variação da energia interna da bateria, $\frac{dE_B}{dt} = \dot{C}$, onde \dot{C} é a taxa de descarga, em Watt. Logo:

$$\frac{dE_{ent}}{dt} = (k\dot{m} + \dot{C}) \quad (32)$$

Substituindo 32 em 30:

$$\eta_{GV} = \frac{P_{\acute{u}til}}{k\dot{m} + \dot{C}} \quad (33)$$

4.1.2.2 Rendimentos em série

O balanço de energia pode ser aplicado entre as diversas etapas de conversão de energia para avaliar a eficiência de determinado processo. A energia útil que transita da etapa 1 para a etapa 2 pode ser expressa por:

$$P_2 = \eta_1 P_1 \quad (34)$$

Enquanto a energia não útil L_1 no processo equivale a:

$$L_1 = (1 - \eta_1)P_1 \quad (35)$$

Para uma máquina térmica com diversas etapas de conversão de energia, como é o caso de um veículo, o balanço de energia para um processo com 3 etapas de conversão de energia para um processo com 3 etapas de conversão de energia, por exemplo: $1 \xrightarrow{1^a} 2 \xrightarrow{2^a} 3 \xrightarrow{3^a} 4$, se estende, na forma:

$$P_2 = \eta_1 P_1 \quad (36)$$

$$P_3 = \eta_2 P_2 \quad (37)$$

$$P_4 = \eta_3 P_3 \quad (38)$$

Substituindo P_3 em P_4 :

$$P_4 = \eta_3 \eta_2 P_2 \quad (39)$$

Substituindo P_2 em P_4 :

$$P_4 = \eta_3 \eta_2 \eta_1 P_1 \quad (40)$$

De modo geral, pode-se obter a potência útil ao fim de um processo de n etapas de conversão de energia em série, multiplicando-se a energia na etapa inicial (P_1) pelo produto entre os rendimentos de todas as etapas. [HUSAIN, IQBAL, 2011]:

$$P_n = (\eta_{n-1} \times \eta_{n-2} \times \dots \times \eta_1) P_1 \quad (41)$$

4.1.2.3 Percursos energéticos

Como abordado, o rendimento total em série pode ser obtido multiplicando-se os rendimentos dos diversos componentes ao longo do percurso. Ocorre que, usualmente, os veículos híbridos reais não são construídos com ligações simples em série. Katrašnik [KATRAŠNIK, TOMAZ, 2009] trata da conversão de energia e da eficiência energética para veículos híbridos mais minuciosamente, revelando uma complexidade analítica que está aquém do escopo deste trabalho. Nos veículos aqui analisados, será necessário estudar os percursos energéticos simplificadamente, somando-os para determinar-se o rendimento global do veículo. Um percurso energético é basicamente um dos caminhos em série em que a variação da energia interna de um dos componentes (tanque, bateria) pode chegar à roda. A eficiência energética do veículo será a soma dos percursos dividida pela taxa de entrada de energia química advinda do combustível.

4.1.2.3.1 HEV em série

No modelo HEV em série, a energia pode seguir dois percursos:

- Percurso HEV em série I:

Tanque→ICE→Gerador→Conversor→EE→Transmissão→Roda

- Percurso HEV em série II:

Tanque→ICE→Gerador→Conversor→Bateria→EE→Transmissão→Roda

No primeiro percurso, a energia não passa pela bateria, indo diretamente do conversor para o motor. Pode-se encontrar a parcela da energia da queima, $\dot{m}k$, que chega à roda ($P_{\text{útil}}$) através deste percurso:

$$P_1 = \beta(\dot{m}k)\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T \quad (42)$$

Onde η_{ICE} é a eficiência energética do motor à combustão, η_G a eficiência energética do gerador, η_{CP} a eficiência energética do conversor de potência, η_{EE} a eficiência energética do motor elétrico e η_T a eficiência da transmissão. O termo β representa a fração da energia que não transita pela bateria, indo diretamente do conversor para o motor. Será necessário trabalhar com o termo β ao longo deste trabalho, pois a taxa de uso da bateria não pode ser trivialmente determinada com as equações analíticas. Esse é um ponto que está sendo estudado pela pesquisa empírica. Por representar a proporção entre uma parcela e o todo, o termo β precisa necessariamente estar definido no intervalo $0 \leq \beta \leq 1$.

O percurso HEV em série II é caracterizado como:

$$P_2 = (1 - \beta)(\dot{m}k)\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}^2\eta_B\eta_{EE}\eta_T \quad (43)$$

Onde η_B é a eficiência energética da bateria. O termo $(1 - \beta)$ representa a parcela da energia útil que passa pela bateria antes de seguir para o conversor de potência. A potência útil entregue na roda será a soma dos dois percursos:

$$P_{\text{útil}} = \beta(\dot{m}k)\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T + (1 - \beta)(\dot{m}k)\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}^2\eta_B\eta_{EE}\eta_T \quad (44)$$

A equação pode ser reorganizada na forma:

$$P_{\text{útil}} = (\dot{m}k)\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T[\beta + (1 - \beta)\eta_{CP}\eta_B] \quad (45)$$

Como não há descarga autônoma da bateria, $\dot{C} = 0$, logo:

$$\frac{P_{\text{útil}}}{\dot{m}k} = \eta_{GV} = \eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T[\beta + (1 - \beta)\eta_{CP}\eta_B] \quad (46)$$

O fluxograma de fluxo de potência entre os componentes internos é apresentado na figura 23.

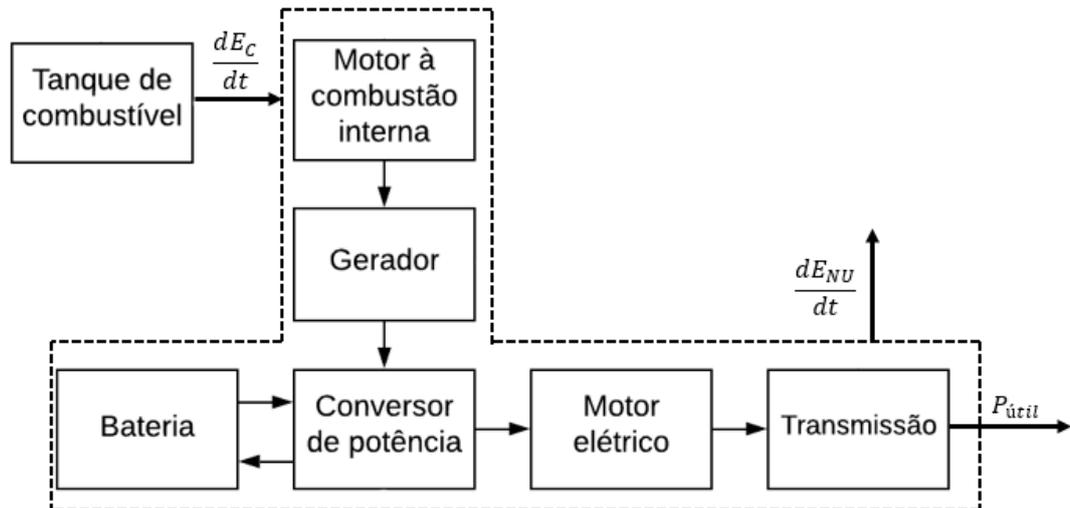


Figura 23 - Fluxograma do sistema HEV em série, com o volume de controle, entradas e saídas representados

É possível observar que no volume de controle não está contido o tanque de combustível, já que foi desejado representar a entrada de combustível no sistema (calor) a partir dele. Além disso, estão representadas a taxa de saída de potência não útil e a potência útil do sistema.

4.1.2.3.2 FCHEV

Assim como no modelo HEV em série, o esquema FCHEV também contém dois percursos. A energia gerada na célula combustível pode abastecer diretamente o motor elétrico ou ser armazenada temporariamente na bateria para ser utilizada depois.

- Percurso FCHEV I:

Tanque → FC → Conversor → EE → Transmissão → Roda

- Percurso FCHEV II:

Tanque → FC → Conversor → Bateria → EE → Transmissão → Roda

Na figura 24 é apresentado o fluxograma da potência transitando entre os

componentes internos do FCHEV.

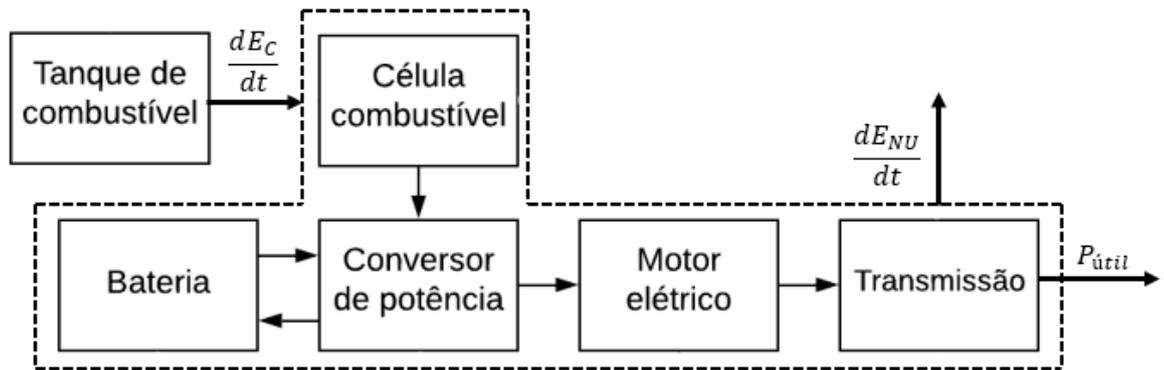


Figura 24 - Fluxograma do sistema FCHEV, com volume de controle, entradas e saídas representados

O volume de controle, assim como as entradas e saídas, estão representados também na figura 24.

Usando os mesmos conceitos da análise anterior, pode-se definir a energia entregue à roda a partir de cada percurso:

$$P_1 = \beta(\dot{m}k)\eta_{FC}\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T \quad (47)$$

$$P_2 = (1 - \beta)(\dot{m}k)\eta_{FC}\eta_{CP}^2\eta_B\eta_{EE}\eta_T \quad (48)$$

Sendo a potência útil total a soma de ambas:

$$P_{\text{útil}} = \beta(\dot{m}k)\eta_{FC}\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T + (1 - \beta)(\dot{m}k)\eta_{FC}\eta_{CP}^2\eta_B\eta_{EE}\eta_T \quad (49)$$

Como não há descarga autônoma da bateria, $\dot{C} = 0$, logo:

$$\frac{P_{\text{útil}}}{\dot{m}k} = \eta_{GV} = \eta_{FC}\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T[\beta + (1 - \beta)\eta_{CP}\eta_B] \quad (50)$$

4.1.2.3.3 PHEV

No modelo PHEV, além dos percursos analisados no HEV em série, também há descarga autônoma da bateria, que é abastecida previamente via plug-in na rede. Neste caso, parte da potência útil é atribuída ao componente \dot{C} de descarga autônoma da bateria.

- Percurso PHEV I:

Tanque→ICE→Gerador→Conversor→EE→Transmissão→Roda

- Percurso PHEV II:

Tanque→ICE→Gerador→Conversor→Bateria→EE→Transmissão→Roda

- Percurso PHEV III:

Bateria→EE→Transmissão→Roda

A potência útil que chega à roda a partir de cada percurso pode ser descrita como:

$$P_1 = \beta(\dot{m}k)\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T \quad (51)$$

$$P_2 = (1 - \beta)(\dot{m}k)\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}^2\eta_B\eta_{EE}\eta_T \quad (52)$$

$$P_3 = \dot{C}\eta_B\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T \quad (53)$$

Para encontrar a potência útil, soma-se a potência de cada percurso:

$$P_{\acute{u}til} = \beta(\dot{m}k)\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T + (1 - \beta)(\dot{m}k)\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}^2\eta_B\eta_{EE}\eta_T + \dot{C}\eta_B\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T \quad (54)$$

Organizando:

$$P_{\acute{u}til} = (\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T)\{\eta_{ICE}\eta_G[\beta(\dot{m}k) + (1 - \beta)(\dot{m}k)\eta_{CP}\eta_B] + \dot{C}\eta_B\} \quad (55)$$

Dividindo por $\dot{m}k + \dot{C}$, que é a taxa de entrada de energia no sistema:

$$\frac{P_{\acute{u}til}}{\dot{m}k + \dot{C}} = \eta_{GV} = \eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T \left\{ \frac{\eta_{ICE}\eta_G(\dot{m}k)[\beta + (1 - \beta)\eta_{CP}\eta_B] + \dot{C}\eta_B}{\dot{m}k + \dot{C}} \right\} \quad (56)$$

O componente $\dot{m}k + \dot{C}$ representa a potência conjunta fornecida pela bateria e pelo tanque. Neste modelo, só será possível calcular a eficiência energética conhecendo-se a relação entre a vazão de combustível, \dot{m} , e a taxa de descarga, \dot{C} . Para determinar essa relação, será feita a suposição de que o consumo de combustível e a descarga da bateria seguem uma trajetória equilibrada, de modo que, para um trajeto que se inicia com tanque e bateria cheios, ambos se esgotam ao mesmo tempo. A potência entregue à roda pelo combustível P_C pode ser escrita como a soma dos percursos P_1 e P_2 :

$$P_C = P_1 + P_2 = [\beta(\eta_{CP} - 1) + 1](\dot{m}k)\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}\eta_B\eta_{EE}\eta_T \quad (57)$$

O trabalho mecânico realizado associado ao combustível seria:

$$W_C = \int_{t_i}^{t_f} [\beta(\eta_{CP} - 1) + 1](\dot{m}k)\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}\eta_B\eta_{EE}\eta_T dt \quad (58)$$

$$W_C = k[\beta(\eta_{CP} - 1) + 1]\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}\eta_B\eta_{EE}\eta_T \int_{t_i}^{t_f} \dot{m} dt \quad (59)$$

$$W_C = k[\beta(\eta_{CP} - 1) + 1]\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}\eta_B\eta_{EE}\eta_T [m(t_f) - m(t_i)] \quad (60)$$

$$W_C = -k[\beta(\eta_{CP} - 1) + 1]\eta_{ICE}\eta_G\eta_{CP}\eta_B\eta_{EE}\eta_T \Delta m \quad (61)$$

Analogamente, o trabalho W_B realizado pela descarga da bateria pode ser determinado integrando o percurso P_3 em relação ao tempo:

$$W_B = \eta_B\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T \int_{t_i}^{t_f} \dot{C} dt \quad (62)$$

$$W_B = \eta_B\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T [C(t_f) - C(t_i)] \quad (63)$$

$$W_B = -\eta_B\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T \Delta C \quad (64)$$

Deste modo, a relação entre o trabalho associado ao combustível e o trabalho associado à bateria será:

$$\frac{W_C}{W_B} = [\beta(\eta_{CP} - 1) + 1]\eta_{ICE}\eta_G k \frac{\Delta m}{\Delta C} \quad (65)$$

$$W_C = [\beta(\eta_{CP} - 1) + 1]\eta_{ICE}\eta_G k \frac{\Delta m}{\Delta C} W_B \quad (66)$$

Onde Δm será a capacidade máxima do tanque, em kg, e ΔC a capacidade máxima da bateria, em J. Derivando a equação em relação ao tempo:

$$P_C = [\beta(\eta_{CP} - 1) + 1]\eta_{ICE}\eta_G k \frac{\Delta m}{\Delta C} P_B \quad (67)$$

Igualando à equação (57):

$$P_B = \dot{m} \eta_{CP} \eta_B \eta_{EE} \eta_T \frac{\Delta C}{\Delta m} \quad (68)$$

A potência entregue na roda pela bateria é também o percurso P_3 . Igualase P_B e P_3 :

$$\dot{C} \eta_B \eta_{CP} \eta_{EE} \eta_T = \dot{m} \eta_{CP} \eta_B \eta_{EE} \eta_T \frac{\Delta C}{\Delta m} \quad (69)$$

$$\dot{C} = \dot{m} \frac{\Delta C}{\Delta m} \quad (70)$$

Substituindo na equação (56):

$$\eta_{GV} = \eta_{CP} \eta_{EE} \eta_T \left\{ \frac{\eta_{ICE} \eta_G (\dot{m} k) [\beta + (1 - \beta) \eta_{CP} \eta_B] + \dot{m} \frac{\Delta C}{\Delta m} \eta_B}{\dot{m} k + \dot{m} \frac{\Delta C}{\Delta m}} \right\} \quad (71)$$

$$\eta_{GV} = \eta_{CP} \eta_{EE} \eta_T \left\{ \frac{\eta_{ICE} \eta_G k [\beta + (1 - \beta) \eta_{CP} \eta_B] + \frac{\Delta C}{\Delta m} \eta_B}{k + \frac{\Delta C}{\Delta m}} \right\} \quad (72)$$

O fluxograma da configuração PHEV está representado na figura 25, no qual é possível observar o fluxo de potência entre os elementos.

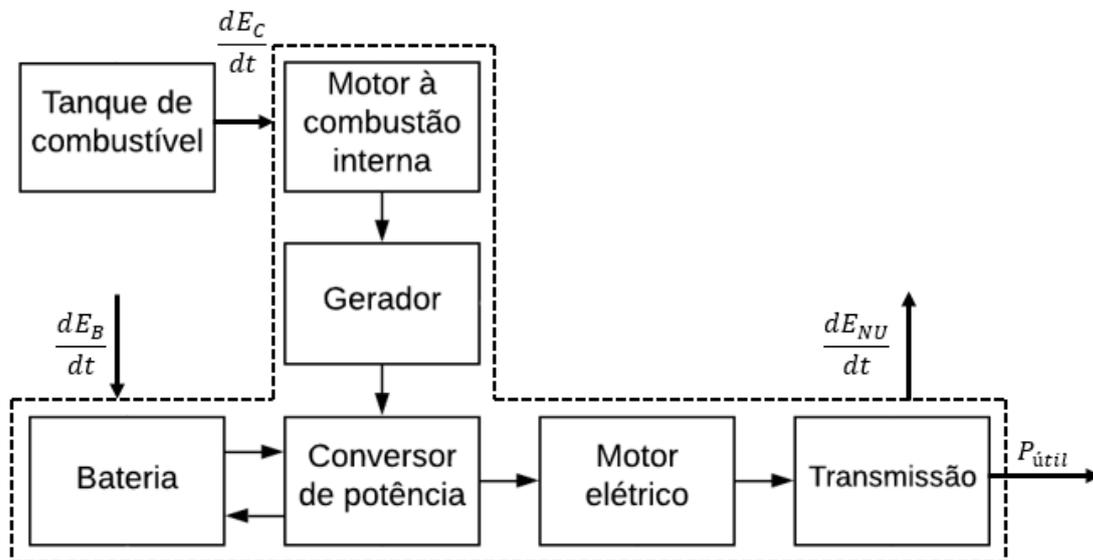


Figura 25 - Fluxograma do sistema PHEV, com volume de controle, entradas e saídas representados

O volume de controle também não contém o tanque de combustível, sendo possível representar a taxa de potência fornecida ao sistema em forma de calor, e as saídas do sistema, a saber: taxa de saída da potência não útil e a potência útil.

4.1.3 ANÁLISE ECONÔMICA

Além dos aspectos técnicos, o presente trabalho irá analisar a viabilidade econômica da aquisição de um veículo híbrido. Para isso, faz-se necessário introduzir alguns conceitos aplicáveis aos investimentos e ao mercado de capitais. Por exemplo: determinado veículo pode ter um custo de aquisição mais elevado que outro, mas em compensação acarretar menores custos de operação ao longo do tempo devido a uma maior eficiência energética. Para uma análise ao longo do tempo e determinação da escolha economicamente mais vantajosa, torna-se apropriado o uso da ferramenta contábil conhecida como Valor Presente Descontado (*VPD*) [PINDYCK, ROBERT *et al*, 2013].

4.1.3.1 Valor presente descontado

A ideia de trazer fluxos futuros a valor presente assume como dada uma premissa fundamental: obter determinada quantia V de dinheiro num instante $t + 1$ não significa o mesmo que obter V no instante t , dado que o mesmo montante V aplicado no instante t à taxa de juro de mercado, R , poderia gerar um retorno equivalente a RV no instante $t + 1$. Portanto, para qualquer taxa de juro positiva, obter V no futuro implica uma perda em relação a obter V no presente, ou seja, implica em um Valor Presente Descontado menor. Em termos algébricos:

$$VPD \text{ de R\$ } 1,00 \text{ pago hoje} = \text{R\$ } 1,00$$

$$VPD \text{ de R\$ } 1,00 \text{ pago daqui a 1 ano} = \frac{\text{R\$ } 1,00}{1 + R}$$

$$VPD \text{ de R\$ } 1,00 \text{ pago daqui a 2 anos} = \frac{\text{R\$ } 1,00}{(1 + R)^2}$$

⋮

$$VPD \text{ de R\$ } 1,00 \text{ pago daqui a } t \text{ anos} = \frac{\text{R\$ } 1,00}{(1 + R)^t}$$

Onde R é a taxa de juro de mercado.

4.1.3.2 Modelo Económico

Para avaliar o VPD de um veículo, é preciso trazer todos os fluxos associados à sua compra e uso para valor presente. Assumindo uma taxa de juro constante, obtém-se:

$$VPD_V = \Pi + O_0 + \frac{O_1}{1+R} + \frac{O_2}{(1+R)^2} + \dots + \frac{O_t}{(1+R)^t} - \frac{V_t}{(1+R)^t} \quad (73)$$

Onde VPD_V é o valor presente descontado dos custos associados à aquisição do veículo, Π o custo inicial, t o número de períodos de uso, O_t o custo operacional V_t o valor de venda do veículo, ambos no período t .

Se o veículo se deprecia a uma taxa constante ao longo dos anos, pode-se determinar seu valor de venda como:

$$V_t = \Pi(1 - \delta)^t \quad (74)$$

Onde δ (taxa de depreciação) representa a perda relativa de valor patrimonial ao longo de um ciclo. A fórmula de valor presente descontado assumiria a forma:

$$VPD_V = \Pi \left[1 - \left(\frac{1 - \delta}{1 + R} \right)^t \right] + O_0 + \frac{O_1}{1 + R} + \frac{O_2}{(1 + R)^2} + \dots + \frac{O_t}{(1 + R)^t} \quad (75)$$

Caso o veículo seja utilizado até o fim de sua vida útil, V_t será o valor de venda como sucata, prevalecendo a equação 75.

Conhecendo-se o custo de aquisição do veículo, os custos operacionais (que dependem fortemente da eficiência energética), a taxa de depreciação e a taxa de juro esperada, pode-se calcular o VPD esperado, e então comparar os modelos por sua viabilidade econômica. Não há restrição quanto à unidade de tempo usada no cálculo de VPD (ano, mês, semana), desde que seja a mesma unidade em que é contabilizado a taxa de juro R e o custo operacional Π .

Essa análise não leva em conta a inflação por estar lidando com ativos reais, e não financeiros. Uma elevação geral nos preços impacta tanto no preço do combustível quanto no custo de manutenção, mas também impacta no preço de revenda do automóvel usado. Segundo Pindyck [38], nesse tipo de análise é

possível ignorar a inflação desde que seja usado o juro real (juro nominal - inflação) e não nominal no parâmetro R .

4.2 ESCOLHA DOS SISTEMAS

A escolha dos três sistemas a serem analisados foi feita com base na semelhança entre as configurações. Escolheu-se primeiro o sistema HEV em série, com base em sua simplicidade. Em seguida, buscou-se outros dois sistemas em que a sequência dos processos internos fosse semelhante ao HEV em série.

Dessa forma, os sistemas escolhidos para a análise foram o HEV em série, PHEV e o FCHEV.

4.3 ESCOLHA DO VEÍCULO

A escolha do veículo base para a adaptação dos sistemas anteriormente escolhidos foi realizada após pesquisa, nos catálogos das principais montadoras de HEV encontrados.

A maior dificuldade dessa etapa é encontrar um veículo com as informações necessárias para que a análise fosse feita, como por exemplo, coeficiente de arrasto, área frontal, marca e modelo de cada componente, etc.

Por fim, o carro escolhido para ser a base da análise foi o Ford Fusion 2019, com sistema Full Hybrid, que era o HEV que possuía mais informações catalogadas pelo fabricante. [Página da Ford]

4.4 ESCOLHA DO CENÁRIO

Definir as condições de contorno é necessário para delimitar a análise, dando parâmetros para que a comparação entre os sistemas seja feita da maneira mais objetiva possível.

4.4.1 EFICIÊNCIAS DOS COMPONENTES DE CADA SISTEMA

Para o cálculo da eficiência energética, e posterior análise econômica, se fez necessária a busca pela eficiência de cada etapa de transformação de energia, onde cada uma é caracterizada por ser realizada por um componente do sistema. Além disso, foram pesquisados os custos atuais dos combustíveis e da energia elétrica, além de outras condições de contorno assumidas hipoteticamente, a fim

de adequar o trabalho à realidade.

4.4.1.1 Condições de contorno da análise energética

Segundo Pulkrabek [WILLARD W. PULKRABEK], a eficiência máxima do motor à combustão interna pode chegar a 35%. Como mencionado no capítulo 2, a maior vantagem do modelo HEV em série e PHEV é que o motor à combustão pode operar próximo de sua relação torque x potência que produz a melhor eficiência energética, melhorando a eficiência energética total do veículo em relação aos ICEV.

Com relação aos geradores, para a finalidade de realizar cálculos estimativos, é comum considerar a eficiência do gerador como 90% [Página engenheiro José Cláudio].

A respeito da bateria, considerando a alta eficiência e as vantagens citadas anteriormente das baterias a base de lítio, e que esta é constituinte do veículo previamente escolhido, será considerada uma eficiência de 90% [CHRIS MI *et al*, 2017]. Ainda de acordo com Chris Mi *et al*, a transmissão *dual clutch* vem sendo amplamente utilizada em HEV, já que possui uma eficiência de 96%.

Em consulta ao material divulgado pelo SEBRAE, foi encontrada uma eficiência máxima para os motores elétricos de 96,5%.

Para a célula combustível, segundo Vliete [P. R. V. V. OSCAR *et al*, 2010] pode-se assumir, durante um ciclo de acionamento uma eficiência constante de 55%. É possível confirmar que essa eficiência é bem próxima da eficiência prática de operação da célula combustível, segundo Merhdad [EHSANI, MEHRDAD *et al*, 2018], como pode ser visto na figura 26.

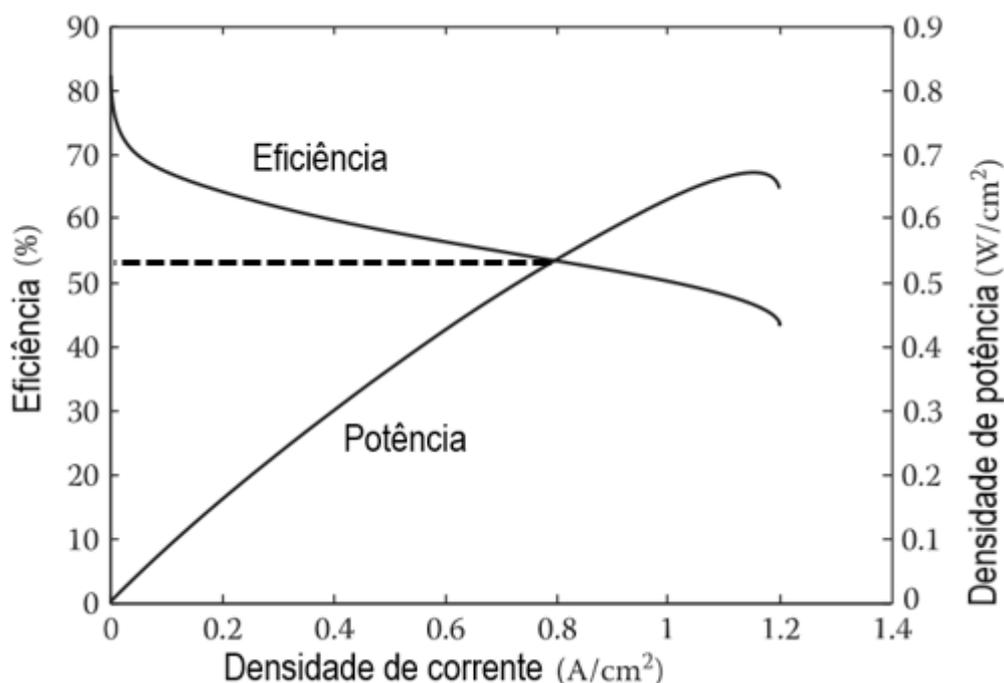


Figura 26 - Eficiência de operação e densidade de potência em conjunto com a densidade de corrente de uma célula combustível à hidrogênio
 Fonte: Ehsani, Mehrdad, 2018

A figura 26 mostra que a eficiência energética da célula combustível inicialmente decai bruscamente com a potência fornecida. Após isso, para incrementos de potência, a queda de eficiência se mantém, porém de maneira suave. Para as aplicações usuais, a faixa de eficiência permanece mais ou menos entre 60% a 50%, tornando apropriada uma aproximação da média para 55%, como recomenda Vliete [P. R. V. V. OSCAR *et al*, 2010].

Em suma, as eficiências de cada componente estão resumidas na tabela 10.

Tabela 10 - Eficiências de cada componente integrante dos sistemas HEV

η_{ICE}	η_{CC}	η_G	η_{CP}	η_{EE}	η_T	η_B
0,350	0,55	0,900	0,850	0,965	0,960	0,900

4.4.1.2 Velocidade de operação e perfil da pista

As velocidades de operação do veículo dependem do percurso escolhido. Para analisar a potência de operação, é necessário escolher um percurso padrão. Neste trabalho, será arbitrado a seguinte configuração para as velocidades:

- 1/3 do tempo a 30 km/h;
- 1/3 do tempo a 60 km/h;

- 1/3 do tempo a 90 km/h

Resultando em uma velocidade média de 60 km/h.

Por motivos estritamente simplificadores, não será considerada a aceleração nem a desaceleração do veículo até essas velocidades, tampouco entre elas.

As inclinações da via também impactam na demanda por potência. Analogamente à velocidade, é necessário fixar um perfil de inclinação padrão para as comparações. Para a inclinação da via, será arbitrada a seguinte configuração:

- 90% do tempo em terreno plano ($i = 0\%$)
- 8% do tempo em inclinação moderada ($i = 4\%$)
- 2% do tempo em inclinação elevada ($i = 8\%$)

O percurso não irá incluir descidas. Se, por um lado, esta escolha aumenta a demanda por potência, possivelmente subestimando a autonomia de combustível em relação a uma rotina real de uso do veículo, é necessário levar em conta que a presente análise desconsidera as demandas resultantes da aceleração; o que, por outro lado, poderia superestimar a autonomia.

4.4.1.3 Condições de contorno para a análise econômica

Alguns parâmetros com relação ao trajeto feito pelo motorista foram hipoteticamente definidos:

- a distância percorrida por ano com o veículo foi estipulada como 14.400 km.
- o custo atual da gasolina foi definido em R\$ 4,38/litro. [Agência Nacional do Petróleo].
- o custo da energia elétrica atual encontrada foi de 0,626 R\$/kWh [Agência Nacional da Energia Elétrica].
- Adicionalmente, o custo do hidrogênio será considerado como R\$ 56,00/kg [California Full Cell Partnership, convertido pela taxa de câmbio de 4:1].
- o juro real será admitido como fixo, em 3% ao ano.

Por fim, de acordo com o site do fabricante, o custo anual de manutenção em cada revisão é mostrado na tabela 11 [Página da Ford].

Tabela 11 - Custo anual de manutenção em cada revisão

Revisões anuais	Custo (CM)
1ª	R\$300,00
2ª	R\$600,00
3ª	R\$500,00
4ª	R\$1.250,00
5ª	R\$531,00
6ª	R\$1.288,00
7ª	R\$531,00
8ª	R\$1.249,00
9ª	R\$499,00
10ª	R\$927,00

Fonte: Página da Ford

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DINÂMICA

5.1.1 CÁLCULO DA POTÊNCIA DE ACIONAMENTO NA RODA

A potência de acionamento na roda aplicada nos veículos híbridos é um fator importante no cálculo da eficiência energética, de modo análogo às diferentes categorias de transporte, a saber, ônibus e caminhões. Valores ótimos de potência de acionamento são fundamentais para alcançar maior eficiência energética, associada com menor consumo de combustível, para veículos híbridos que utilizem motores de combustão interna.

Como foi desenvolvido na equação de demanda por potência, 21, pode-se determinar a potência de acionamento na roda em função de alguns parâmetros chave. Foi arbitrado nas condições de contorno que a aceleração do veículo será nula, ou seja, $\frac{dV}{dt} = 0$. A velocidade dos ventos será desprezada, tornando $V_w = 0$. Logo, a equação 21 assume a forma:

$$P_{\text{útil}} = V \left(M \left(g \left(0,01 \left(1 + \frac{3,6V}{160} \right) + i \right) \right) + \frac{1}{2} \rho A_f C_D V^2 \right) \quad (76)$$

Considerando a equação anterior, pode-se calcular a demanda de potência nas rodas para diversos cenários de velocidade do veículo escolhido.

Assumem-se os seguintes parâmetros fixos:

$$M = 2000 \text{ kg}$$

$$A_f = 2,32 \text{ m}^2$$

$$C_D = 0,28$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$$

Logo:

Tabela 12 - Ford Fusion, demanda por potência na roda, kW (continua)

Velocidade do veículo (km/h)	130	32.7	61.1	89.4	117.7	146.1	174.4
	120	27.1	53.2	79.4	105.6	131.7	157.9
	110	22.2	46.1	70.1	94.1	118.1	142.1
	100	17.9	39.7	61.5	83.3	105.1	126.9
	90	14.3	33.9	53.5	73.1	92.7	112.4
	80	11.2	28.6	46.1	63.5	80.9	98.4
	70	8.6	23.8	39.1	54.4	69.6	84.9

Tabela 12 - Ford Fusion, demanda por potência na roda, kW (conclusão)

60	6.5	19.5	32.6	45.7	58.8	71.9
50	4.7	15.6	26.5	37.4	48.3	59.2
40	3.3	12.0	20.7	29.5	38.2	46.9
30	2.2	8.7	15.3	21.8	28.3	34.9
20	1.3	5.7	10.0	14.4	18.7	23.1
10	0.6	2.8	4.9	7.1	9.3	11.5
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0%	4%	8%	12%	16%	20%

Inclinação da via (H/L)

A tabela 12 mostra as potências de acionamento na roda em kW para o veículo Ford Fusion. Observa-se que os valores de velocidade variam entre 0-130 km/h, bem como os valores de inclinação variam entre 0%-20%. Como foi definido nas condições de contorno, a velocidade média do veículo é 60 km/h, variando entre 30 km/h a 90 km/h, e as inclinações foram consideradas entre 0% a 8%. Com os dados da tabela 12, pode-se calcular o consumo médio de potência em terreno plano ($i=0\%$):

$$P_{\text{útil}}^{i=0\%} = \frac{2,2 + 6,5 + 14,3}{3} = 7,67kW \quad (77)$$

Inclinação de 4%:

$$P_{\text{útil}}^{i=4\%} = \frac{8,7 + 19,5 + 33,9}{3} = 20,7kW \quad (78)$$

Inclinação de 8%:

$$P_{\text{útil}}^{i=8\%} = \frac{15,3 + 32,6 + 53,5}{3} = 33,8kW \quad (79)$$

Como arbitrado nas condições de contorno, o Ford Fusion está 90% do tempo se locomovendo em terreno plano, 8% do tempo subindo inclinações de 4% e 2% do tempo subindo inclinações de 8%. Logo, a média ponderada do consumo de potência ($\bar{P}_{\text{útil}}$) será igual

$$P_{\text{útil}} = 0,9P_{\text{útil}}^{i=0\%} + 0,08P_{\text{útil}}^{i=4\%} + 0,02P_{\text{útil}}^{i=8\%} \quad (80)$$

$$P_{\text{útil}} = 0,9 \times 7,7 + 0,08 \times 20,7 + 0,02 \times 33,8 = 9,2kW \quad (81)$$

5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE ENERGÉTICA

5.2.1 APLICAÇÃO TERMODINÂMICA

5.2.1.1 Parâmetros

Taxa instantânea de uso da bateria = $\beta, 0 \leq \beta \leq 1$

Poder calorífico da gasolina = $k_g = 40,17 \times 10^6 J/kg$

Poder calorífico do hidrogênio = $k_h = 120 \times 10^6 J/kg$

Capacidade máxima do tanque = $\Delta m = 39,75 kg$

Capacidade máxima da bateria = $\Delta C = 5,62 \times 10^6 J$

Potência útil de acionamento na roda = $P_{\text{útil}} = 9,2 kW$

5.2.1.1.1 HEV em série

A eficiência energética do veículo HEV em série é dada por:

$$\eta_{GV} = \eta_{ICE} \eta_G \eta_{CP} \eta_{EE} \eta_T [\beta + (1 - \beta) \eta_{CP} \eta_B] \quad (82)$$

Aplicando-se os parâmetros definidos, encontra-se:

$$0,190 \leq \eta_{GV} \leq 0,248 \quad (83)$$

Dado que para este veículo não há descarga autônoma da bateria, $\dot{C} = 0$:

$$\frac{P_{\text{útil}}}{\dot{m} k_g + \dot{C}} = \frac{P_{\text{útil}}}{\dot{m} k_g} = \eta_{GV} \quad (84)$$

$$\dot{m} = \frac{P_{\text{útil}}}{k_g \eta_{GV}} \quad (85)$$

Aplicando-se os valores:

$$0,92 \times 10^{-3} kg/s \leq \dot{m} \leq 1,21 \times 10^{-3} kg/s \quad (86)$$

Convertendo a taxa de queima para kg/h:

$$3,32 kg/h \leq \dot{m} \leq 4,35 kg/h \quad (87)$$

Dividindo a desigualdade pela massa específica da gasolina ($0,75 kg/l$):

$$4,43 l/h \leq \dot{m} \leq 5,79 l/h \quad (88)$$

Dividindo-se a velocidade média de operação (60km/h) pela taxa de queima (4,43l/h a 5,79l/h), é possível obter a Rodagem por Volume de Combustível, que será chamada de *RPC*. Para o caso do HEV em série, a unidade da variável *RPC* será quilômetro/litro.

$$10,36km/l \leq RPC_{HEV} \leq 13,54km/l \quad (89)$$

5.2.1.1.2 FCHEV

A eficiência energética do veículo FCHEV é dada por:

$$\eta_{GV} = \eta_{FC}\eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T[\beta + (1 - \beta)\eta_{CP}\eta_B] \quad (90)$$

Aplicando-se os parâmetros definidos, encontra-se:

$$0,331 \leq \eta_{GV} \leq 0,433 \quad (91)$$

Dado que para este veículo também não há descarga autônoma da bateria, $\dot{C} = 0$:

$$\frac{P_{\acute{u}til}}{\dot{m}k_h + \dot{C}} = \frac{P_{\acute{u}til}}{\dot{m}k_h} = \eta_{GV} \quad (92)$$

$$\dot{m} = \frac{P_{\acute{u}til}}{k_h\eta_{GV}} \quad (93)$$

Aplicando-se os valores:

$$1,77 \times 10^{-4}kg/s \leq \dot{m} \leq 2,31 \times 10^{-4}kg/s \quad (94)$$

Convertendo a taxa de queima para kg/h:

$$0,64kg/h \leq \dot{m} \leq 0,83kg/h \quad (95)$$

Dividindo-se a velocidade média de operação (60 km/h) pela taxa de queima (0,64kg/h a 0,83kg/h), pode-se obter a rodagem por combustível mássica, que também será chamada de RPC . Para o caso do FCHEV, a unidade da variável RPC será km/kg.

$$72,36km/kg \leq RPC_{FCV} \leq 94,15km/kg \quad (96)$$

5.2.1.1.3 PHEV

A eficiência energética do veículo PHEV é dada por:

$$\eta_{GV} = \eta_{CP}\eta_{EE}\eta_T \left\{ \frac{\eta_{ICE}\eta_G k[\beta + (1 - \beta)\eta_{CP}\eta_B] + \frac{\Delta C}{\Delta m}\eta_B}{k + \frac{\Delta C}{\Delta m}} \right\} \quad (97)$$

Aplicando-se os parâmetros definidos, encontra-se:

$$0,213 \leq \eta_{GV} \leq 0,277 \quad (98)$$

Dado que para este veículo há descarga autônoma da bateria, $\dot{C} \neq 0$:

$$\frac{P_{\acute{u}til}}{\dot{m}k + \dot{C}} = \eta_{GV} \quad (99)$$

Sabe-se que:

$$\dot{C} = \dot{m} \frac{\Delta C}{\Delta m} \quad (100)$$

Logo:

$$\dot{m} = \frac{P_{\acute{u}til}}{\eta_{total} \left(k_g + \frac{\Delta C}{\Delta m} \right)} \quad (101)$$

Aplicando-se os valores:

$$0,824 \times 10^{-3} kg/s \leq \dot{m} \leq 1,074 \times 10^{-3} kg/s \quad (102)$$

Convertendo a taxa de queima para kg/h:

$$2,96 kg/h \leq \dot{m} \leq 3,86 kg/h \quad (103)$$

Dividindo a desigualdade pela massa específica da gasolina (0,75kg/l):

$$3,95 kg/h \leq \dot{m} \leq 5,15 kg/h \quad (104)$$

Dividindo-se a velocidade média de operação (60 km/h) pela taxa volumétrica de queima da gasolina (3,95l/h a 5,15l/h), pode-se obter a *RPC* volumétrica:

$$11,64 km/l \leq RCP_{PHEV} \leq 15,18 km/l \quad (105)$$

Substituindo os valores encontrados de \dot{m} em F:

$$\dot{C} = \dot{m} \frac{\Delta C}{\Delta m} \quad (106)$$

$$116,44 W \leq \dot{C} \leq 151,79 W \quad (107)$$

Convertendo a taxa de descarga para kWh/h:

$$0,116 kWh/h \leq \dot{C} \leq 0,152 kWh/h \quad (108)$$

Dividindo-se a velocidade média de operação (60 km/h) pela taxa de descarga (0,116kWh/h a 0,152kWh/h), pode-se obter a Rodagem por Descarga, que se chama de *RPD*. A unidade da variável *RPD* é *km/kWh*.

$$395,29 km/kWh \leq RPD_{PHEV} \leq 515,31 km/kWh \quad (108)$$

5.2.2 COMPARAÇÕES DE EFICIÊNCIA

O cálculo da eficiência energética é um importante indicador na análise de um sistema térmico. Através dela, a comparação numérica de eficiência, entre as diferentes configurações de veículos híbridos, pode ser realizada através da primeira lei da termodinâmica, com o objetivo de encontrar a configuração que melhor aproveita o combustível inicialmente provido.

A comparação de eficiência é realizada através do gráfico mostrado na

figura 27 abaixo, onde para cada configuração, os limites inferior e superior das faixas de eficiência estão representados.

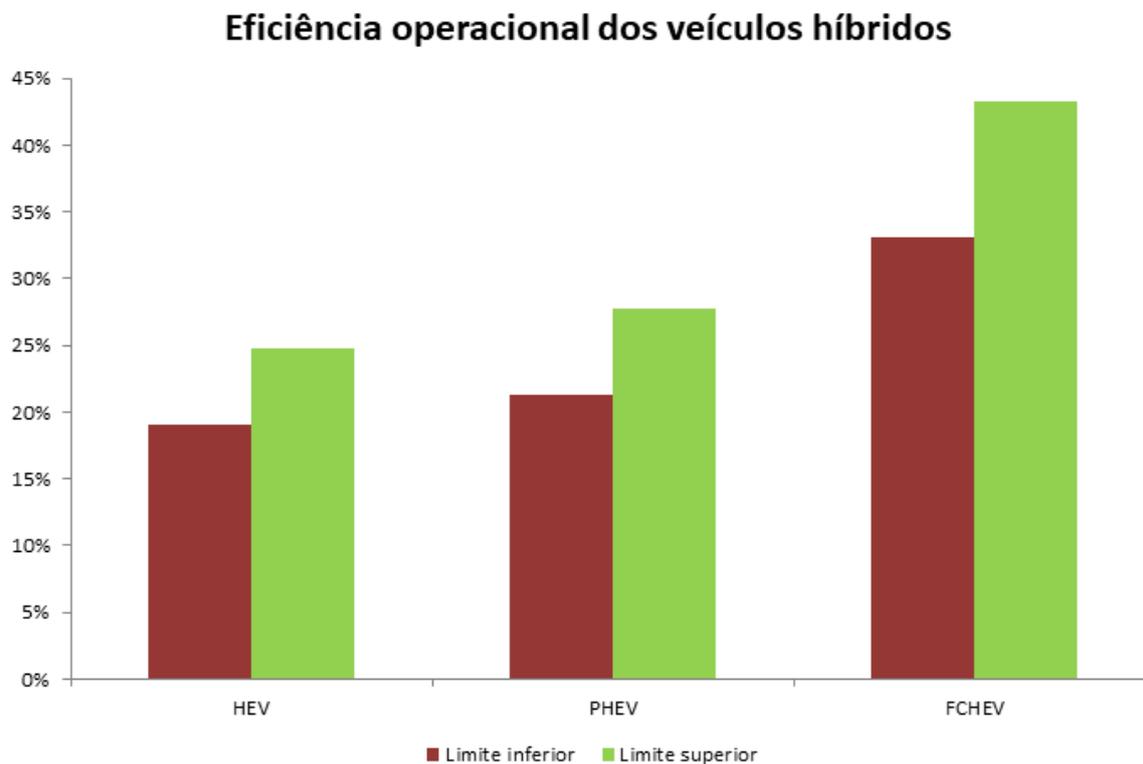


Figura 27 - Comparação de eficiência operacional

Além disso, pode-se observar como a eficiência TTW varia em função do parâmetro β , que representa a diferença entre 0% e 100% da taxa de uso da bateria. Como esperado, quanto menor β , uma maior parcela da energia precisa ser armazenada na bateria, gerando desperdícios energéticos significativos, como pode ser visto na figura 28.

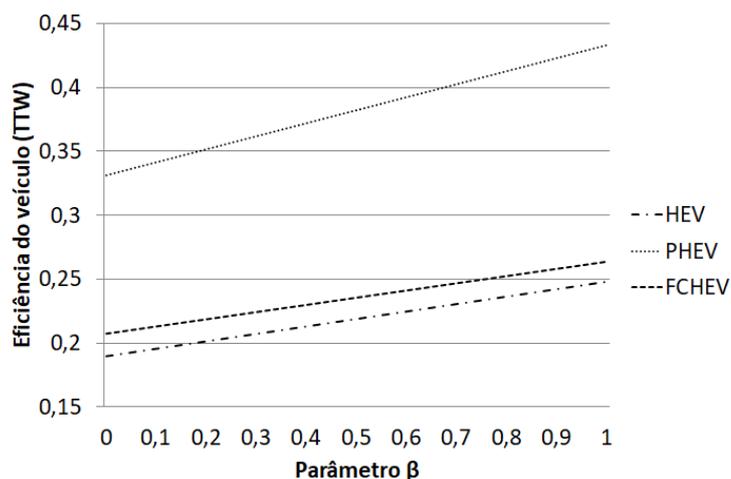


Figura 28 - Eficiência do veículo em função da taxa de uso da bateria

Como era esperado, o veículo movido à célula combustível teve uma eficiência operacional melhor que os veículos dependentes de motores à combustão. Motores à combustão interna térmicas onde, tipicamente, a natureza do processo de conversão de energia está associada a eficiências baixas, e isso foi determinante na eficiência global do veículo. Outro fato esperado era o PHEV ser mais eficiente que o HEV em série. Como no PHEV parte da energia interna que move o veículo não precisa passar pelo motor à combustão, energeticamente ineficiente, para ser transformada em trabalho, é esperado que a eficiência melhore.

Considerando apenas a eficiência energética, o FCHEV é a melhor escolha para substituir os veículos tradicionais com motor à combustão interna, além de considerar que esse sistema é caracterizado por emitir zero poluentes na atmosfera, alcançando, dessa forma, o principal objetivo da adoção de veículos híbridos pela sociedade, que é a conservação ambiental durante a fase de operação do ciclo de vida.

Entretanto, quando levado em conta o custo de operação, o modelo FCHEV se torna o mais dispendioso, dado o alto custo de abastecimento com hidrogênio. Esse ponto será visto nos tópicos seguintes. Os processos químicos destinados à separação do hidrogênio ainda são relativamente caros e consomem bastante energia. Esse último fato cria outra dificuldade, que é de natureza ambiental: não faz sentido ecológico aumentar a eficiência no veículo se a energia que sustenta a preparação do combustível ainda é de base extremamente ineficiente.

5.2.3 COMPARAÇÕES DE CUSTO COM COMBUSTÍVEL

O custo relacionado ao consumo de combustível observado na figura 29 é o principal componente do custo operacional.

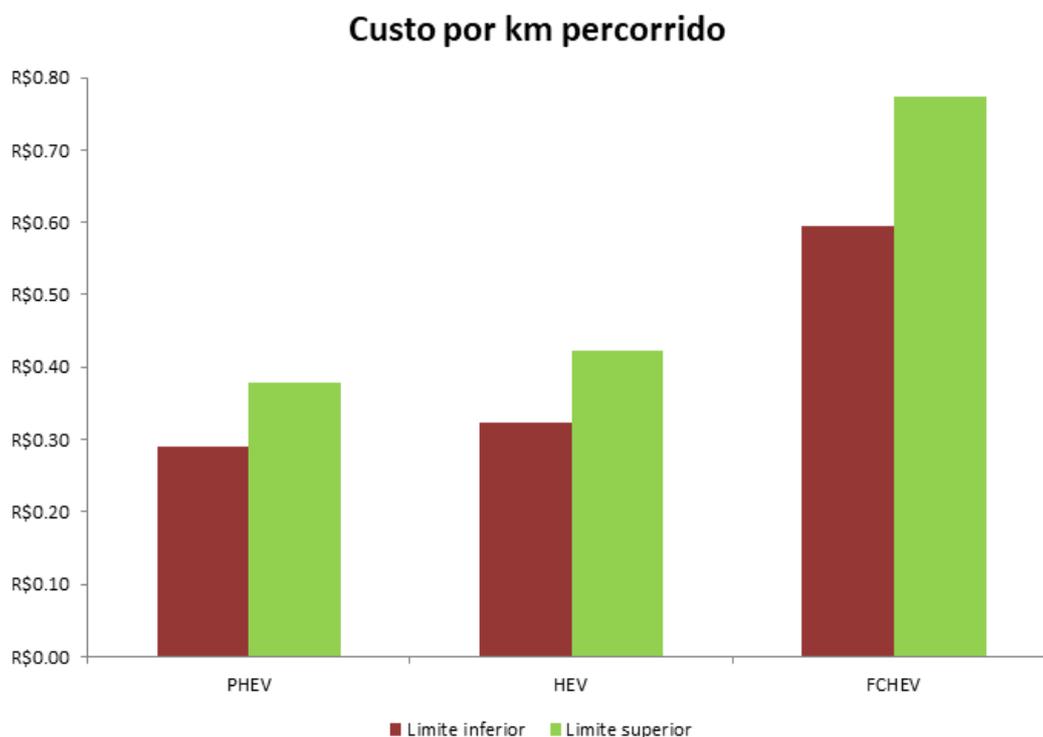


Figura 29 - Comparação de custo por km percorrido

Veículos que apresentam uma maior taxa de consumo de combustível por distância percorrida resultam em maior despesa com combustível ao longo do tempo, tornando seu uso economicamente menos vantajoso. Esse parâmetro depende também do preço do combustível em questão.

Para encontrar o custo do consumo de combustível por distância percorrida, divide-se o preço do combustível por sua taxa de consumo. Para o caso do veículo HEV em série:

$$CDP_{HEV1} = \frac{4,38}{13,54} = R\$ 0,32 \quad (109)$$

$$CDP_{HEV2} = \frac{4,38}{10,36} = R\$ 0,42 \quad (110)$$

$$R\$ 0,32 \leq CDP_{HEV} \leq R\$ 0,42 \quad (111)$$

Onde CDP é a variável relacionada ao custo por distância percorrida. No caso do FCHEV:

$$CDP_{FCHEV1} = \frac{56}{94,15} = R\$ 0,59 \quad (112)$$

$$CDP_{FCHEV2} = \frac{56}{72,36} = R\$ 0,77 \quad (113)$$

$$R\$ 0,59 \leq CDP_{FCHEV} \leq R\$ 0,77 \quad (114)$$

Para o PHEV, além do custo com combustível, é necessário somar o custo relacionado ao carregamento da bateria. Portanto, se tem os custos relacionados ao abastecimento com gasolina:

$$CDP_{PHEV1-g} = \frac{4,38}{15,18} = R\$ 0,29 \quad (115)$$

$$CDP_{PHEV2-g} = \frac{4,38}{11,64} = R\$ 0,38 \quad (116)$$

$$R\$ 0,32 \leq CDP_{PHEV-g} \leq R\$ 0,42 \quad (117)$$

E também o custo de carregamento da bateria:

$$CDP_{PHEV1-g} = \frac{0,626}{515,31} \cong R\$ 0,00 \quad (118)$$

$$CDP_{PHEV2-g} = \frac{0,626}{395,29} \cong R\$ 0,00 \quad (119)$$

Como a despesa com energia elétrica é muito pequena em relação à despesa com combustível líquido, é feita a aproximação do CDP do veículo ao CDP calculado para a gasolina:

$$R\$ 0,29 \leq CDP_{PHEV} \leq R\$ 0,38 \quad (120)$$

Como observado na figura 29, o PHEV aparece como o mais eficiente do ponto de vista de custo operacional com combustível, seguido de perto pelo HEV em série. O FCHEV, apesar de energeticamente mais eficiente, torna-se o veículo mais dispendioso devido ao alto custo do hidrogênio.

5.3 RESULTADOS DA ANÁLISE ECONOMICA

5.3.1 APLICAÇÃO ECONÔMICA

5.3.1.1 Parâmetros utilizados

Distância percorrida por ano = 14400 *km*

Custo de aquisição = $\Pi = R\$ 182.990$

Taxa de depreciação = $\delta = 10\% a. a$

Taxa real de juro = $R = 3\% a. a$

Preço da gasolina = $p_g = R\$ 4,38$

Preço do hidrogênio = $p_h = R\$ 56,00$

Custo operacional no ano $t = O_t$

Custo de manutenção no ano $t = CM_t$

Custo com combustível no ano $t = CC_t$

Taxa de consumo volumétrico da gasolina = V_g

Taxa de consumo mássico do hidrogênio = m_h

5.3.1.1.1 HEV em série

Como foi abordado no capítulo 4, o cálculo do valor presente descontado do veículo pode ser realizado através da seguinte fórmula:

$$VPD_V = \Pi \left[1 - \left(\frac{1 - \delta}{1 + R} \right)^t \right] + O_0 + \frac{O_1}{1 + R} + \frac{O_2}{(1 + R)^2} + \dots + \frac{O_t}{(1 + R)^t} \quad (121)$$

O custo anual de operação do veículo no ano t , O_t , equivale ao custo anual com manutenção, CM_t , acrescido ao custo com combustível, CC_t :

$$O_t = CM_t + CC_t \quad (122)$$

O custo com combustível dependerá tanto do trajeto anual percorrido quanto do preço do combustível. Para as condições de operação arbitradas, a RPC do HEV foi estimada como:

$$10,36km/l \leq RPC_{HEV} \leq 13,54km/l \quad (123)$$

Para um percurso anual de 14.400 km, o volume anual de litros de gasolina demandado será 14400/RPC, estando na faixa de:

$$1063,52l \leq V_g \leq 1389,96l \quad (124)$$

Multiplicando pelo preço do litro da gasolina, obtém-se um custo anual fixo

com combustível da ordem de:

$$R\$ 4658,20 \leq CC_{HEV} \leq R\$ 6.088,03 \quad (125)$$

Pode-se então calcular o VPD para o HEV para as duas categorias de eficiência (máxima e mínima), supondo 10 anos de uso:

$$VPD_{HEV} = \Pi \left[1 - \left(\frac{1 - 0,1}{1 + R} \right)^{10} \right] + CC_0 + \frac{CM_1 + CC_1}{1 + R} + \frac{CM_2 + CC_2}{(1 + R)^2} + \dots + \frac{CM_{10} + CC_{10}}{(1 + R)^{10}} \quad (126)$$

Deste modo obtém-se o Valor Presente Descontado do modelo:

$$R\$ 187.582 \leq VPD_{HEV} \leq R\$ 201.209 \quad (127)$$

5.3.1.1.2 FCHEV

O cálculo de VPD para o FCHEV segue o mesmo roteiro do HEV em série. Para o percurso anual escolhido e para uma eficiência que se situa entre $72,36km/kg \leq RPC_{FCHEV} \leq 94,15km/kg$; o consumo anual de hidrogênio, em kg, será:

$$152,95kg \leq m_h \leq 199,00kg \quad (128)$$

Dado o preço do hidrogênio veicular, $p_h = R\$ 56,00/kg$, obtém-se um custo anual nesta faixa:

$$R\$ 8565,06 \leq CC_{FCHEV} \leq R\$ 11.144,28 \quad (129)$$

Aplicando CC_{FCHEV} na fórmula de VPD:

$$R\$ 224.815 \leq VPD_{FCHEV} \leq R\$ 249.396 \quad (130)$$

5.3.1.1.3 PHEV

No modelo PHEV, há dois estoques de energia interna: combustível líquido e carga elétrica da bateria. Foi determinado que CPL da gasolina e a RPD da bateria se encontram na faixa de:

$$11,64km/l \leq CPL_{PHEV} \leq 15,18km/l \quad (131)$$

$$395,29km/kWh \leq RPD_{PHEV} \leq 515,31km/kWh \quad (132)$$

Resultando um consumo anual entre de combustível e energia elétrica para o trajeto escolhido de:

$$926,64l \leq V_g \leq 1237,11l \quad (133)$$

$$27,94kWh \leq E_e \leq 36,43kWh \quad (134)$$

Multiplicando o preço da gasolina aos volumes requeridos, o preço da energia elétrica aos montantes consumidos, e somando ambos, o custo anual do combustível será:

$$R\$ 4076,18 \leq CC_{PHEV} \leq R\$ 5441,36 \quad (135)$$

Aplicando CC_{PHEV} na fórmula de VDP:

$$R\$ 182.035 \leq VPD_{HEV} \leq R\$ 195.046 \quad (136)$$

5.3.2 COMPARAÇÕES DE CUSTO-BENEFÍCIO

5.3.2.1 Variando o Preço do Veículo

Diferentes modelos apresentaram diferentes VPD devido às diferenças nas eficiências e no preço dos combustíveis utilizados. Isto vale especialmente para o modelo $FCHEV$, que destoou enormemente dos outros dois. Se os três modelos trouxerem os mesmos benefícios em termos de conforto e desempenho, é provável que os consumidores escolham o modelo $PHEV$, já que este tem um VPD mais baixo, tanto no limite inferior quanto superior. Mas é possível estimar numericamente quais preços de venda tornariam cada um dos dois modelos, HEV em série e $FCHEV$, tão vantajosos quanto o mais eficiente, o $PHEV$.

Devido à pequena diferença entre os VPD do HEV em série e do $PHEV$, o custo benefício de ambos os modelos é similar. Por isto, o foco será comparar custos e benefícios entre o modelo $FCHEV$ e $PHEV$. Para tanto, no limite inferior e superior de eficiência, iguala-se o VPD do modelo ao menor VPD do $PHEV$. Isto é:

$$VPD_{PHEV} = \Pi_{FCHEV} \left[1 - \left(\frac{1 - 0,1}{1 + R} \right)^{10} \right] + CC_0 + \frac{CM_1 + CC_1}{1 + R} + \dots + \frac{CM_{10} + CC_{10}}{(1 + R)^{10}} \quad (137)$$

Isolando o custo de aquisição:

$$\Pi_{FCHEV} = \frac{VPD_{PHEV} - CC_0 - \frac{CM_1 + CC_1}{1 + R} - \dots - \frac{CM_{10} + CC_{10}}{(1 + R)^{10}}}{\left[1 - \left(\frac{1 - 0,1}{1 + R} \right)^{10} \right]} \quad (138)$$

Desta maneira, pode-se calcular o custo de aquisição que iguala o VPD do $FCHEV$ ao $PHEV$ substituindo os valores para CC na fórmula. Como há dois VPD ,

um para a eficiência máxima e outro para a mínima, haverá também dois custos de aquisição. Substituindo os parâmetros na fórmula com a ajuda de um software numérico, pode-se determinar Π_{FCHEV} como:

$$R\$ 109.305 \leq \Pi_{FCHEV} \leq R\$ 124.997 \quad (139)$$

Isto significa que, para tornar o consumidor indiferente entre comprar um PHEV e um FCHEV dada a grande diferença no preço do combustível, o custo de aquisição do FCHEV deveria cair drasticamente, para algo entre R\$ 109.305 R\$ 124.997. Isto implicaria em uma redução de 40% no preço final em relação ao cenário base.

5.3.2.2 Variando o Preço do Combustível

Outra forma de tornar o veículo FCHEV economicamente vantajoso é reduzir o preço do combustível. Pode-se adaptar a fórmula 137, substituindo o custo de combustível CC pelo preço do hidrogênio, p_h , multiplicado pela massa consumida anualmente deste combustível no veículo, m_h .

$$VPD_{PHEV} = \Pi_{FCHEV} \left[1 - \left(\frac{1 - 0,1}{1 + R} \right)^{10} \right] + p_h m_h + \frac{CM_1 + p_h m_h}{1 + R} + \dots + \frac{CM_{10} + p_h m_h}{(1 + R)^{10}} \quad (140)$$

Uma vez que todos os parâmetros são dados e esta é uma equação do primeiro grau, há solução analítica para p_h . Entretanto, é mais conveniente resolver numericamente o problema.

Substituindo ambos os VPD na fórmula, p_h estará determinado entre:

$$R\$ 26,54/kg \leq p_h \leq R\$ 27,23/kg \quad (139)$$

Isto implica em uma redução igualmente drástica em relação ao preço base, de R\$ 56,00/kg. Para que uma queda no preço do hidrogênio veicular viabilizasse o seu uso comercial em relação ao PHEV, no nosso exemplo, o seu custo do combustível deveria cair pela metade.

5.4 LIMITAÇÕES E PONTOS POSITIVOS

5.4.1 LIMITAÇÕES NO MODELO DINÂMICO

O modelo dinâmico do carro desconsidera acelerações e frenagens. Isso evidentemente é uma simplificação. Para considerar acelerações, seria necessário ter um percurso onde $V = f(t)$. Além disso, um modelo mais preciso também exigiria $i = g(t)$, de modo a considerar, na análise de demanda por potência na roda, as variações instantâneas de inclinação da via.

5.4.2 LIMITAÇÕES NO MODELO TERMODINÂMICO

O modelo termodinâmico não determinou o quanto da energia proveniente da reação química do combustível (gasolina, hidrogênio) precisou ser acumulada na bateria até ser direcionado ao motor elétrico. Por esse motivo, todas as eficiências foram definidas através de desigualdades, situando-as nos máximos e mínimos. Além disso, parte da energia utilizada nas funções periféricas do veículo (painel, farol) foi ignorada por considerar-se desprezível. De acordo com o Departamento de Economia de Combustível dos Estados Unidos, de 0% a 3% da energia total são usadas para as funções periféricas (U.S Department of Energy), em que a maior parte dessa energia é consumida pelo ar-condicionado. Testes padronizados realizados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos demonstram que com o ar-condicionado desligado, costuma-se considerar desprezível essa parcela da energia. O modelo também se mostra limitado por analisar apenas a eficiência de operação do veículo uma vez abastecido, e não a eficiência energética total desde suas fontes primárias, WTW (petróleo, refinaria, gasolina, etc).

5.4.3 LIMITAÇÕES NO MODELO ECONÔMICO

O modelo econômico considera o juro e a taxa de depreciação como constantes. Isso é mais uma simplificação. Sabe-se que o juro da economia flutua ao longo do tempo, apesar de ser usual considerá-lo constante na literatura por supor-se a existência de um “juro neutro”, tendencial de longo prazo. A taxa de depreciação também pode variar ao longo dos anos, a depender de uma série de elementos, como também pode variar entre modelos. Este trabalho considerou a depreciação constante para tornar possíveis as estimativas, sem que para isso tenham sido sacrificados os pontos essenciais.

5.4.4 PONTOS POSITIVOS

Apesar dessas limitações apresentadas, os modelos atenderam razoavelmente bem às expectativas. Por exemplo: a faixa de eficiência operacional dos modelos tratados condiz com o que seria esperando ao se verificar o que há disponível na literatura, e que foi brevemente mostrado no

capítulo 2. Grande parte das simplificações que limitaram o escopo deste trabalho foi feitas por opção (velocidades, inclinações), restando uma estrutura analítica pronta para ser usada em trabalhos futuros, mais específicos e minuciosos. Em suma, o ponto positivo deste trabalho é que, apesar das diversas simplificações, parece haver razoabilidade nos resultados e há bastante horizonte para pesquisas futuras.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 PRINCIPAIS RESULTADOS

A comparação energética realizada entre as três configurações selecionadas mostrou que o FCHEV possui o sistema mais eficiente dentre elas, na faixa de 33,1% a 43,3% de variação da energia interna transformada em trabalho mecânico. Já os modelos HEV em série e PHEV se assemelham em termos de eficiência quando comparados, variando entre 19% e 24,8% para o primeiro e 21,3% e 27,7% para o segundo.

Por outro lado, quando analisado economicamente, o FCHEV é a configuração mais dispendiosa, apesar de sua eficiência energética. O principal causador desta contradição é o alto custo do hidrogênio veicular quando comparado com a gasolina.

6.2 INTERPRETAÇÃO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS

Fica evidente que a principal tarefa a ser realizada para possibilitar uma melhora consistente da eficiência total nos veículos escolhidos consiste em aprimorar o aproveitamento dos diversos componentes ligados em série, muito mais numerosos que no ICEV. Nos veículos híbridos analisados neste trabalho, o acúmulo de múltiplas pequenas ineficiências em série acaba por gerar uma perda considerável de eficiência global. Além disso, o desenvolvimento de tecnologias mais baratas e eficientes para a obtenção de hidrogênio poderia tornar o modelo à célula combustível, o mais eficiente entre os escolhidos, também economicamente competitivo.

6.3 CONTRIBUIÇÕES DOS RESULTADOS ALCANÇADOS PARA A SOCIEDADE E O MEIO AMBIENTE

O desenvolvimento de novos e melhores veículos híbridos, assim como o aprimoramento das tecnologias existentes, terá grande importância no futuro próximo, dados os enormes desafios climáticos e energéticos a serem enfrentados pelo homem.

As análises energética e econômica realizadas neste trabalho evidenciam o futuro promissor dos veículos híbridos, principalmente da configuração FCHEV, que pelo fato de usar o hidrogênio como combustível, possui a característica de

emitir menos poluentes na atmosfera, diferentemente dos veículos que utilizam combustível derivado de petróleo. Embora a análise econômica evidencie uma desvantagem na aquisição do FCHEV, o desenvolvimento da tecnologia de obtenção e armazenamento de hidrogênio pode levar esta configuração a ser difundida no mercado.

6.4 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Comparação dos resultados deste trabalho com o HEV em paralelo;
- Continuação do estudo deste trabalho considerando velocidade e inclinação variáveis;
- Estudo da melhoria de eficiência de cada elemento do carro híbrido;
- Estudo dos tipos de produção e armazenamento de hidrogênio.
- Realização da análise exergetica
- Realização de estudos paramétricos, testando combinações de eficiência para os diversos componentes internos.
- Avaliação do ciclo de vida.

7 BIBLIOGRAFIA

S. D. HIMADRY; . W. T. CHEE; A.H.M. YATIM. **Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies**. 2017. ELSEVIER.

M. C. JOSÉ apud OECD/IEA. **Impacto dos veículos elétricos no planejamento energético brasileiro: setor de combustíveis fósseis**. Caderno FGV Energia: Carros Elétricos.2017

ANFAVEA, Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Carta da Anfavea**, Janeiro 392. Acesso em: 23 de junho de 2019.

M. V. RODRIGO; J. S. M. CARLOS. **A competência da união para a elaboração de “plano nacional das atividades de exploração de petróleo e gás natural” no Brasil**. 2010.

A. M. THIAGO; R. F SAULO. **Antes do pré-sal: emissões de gases de efeito estufa do setor de petróleo e gás no Brasil**. 2012.

G. JOSÉ. **Mudanças climáticas e desenvolvimento**. 2000.

C. C. CARLOS; E. P. C. CARLOS. **Agricultura e aquecimento global**.

E. D. C. JOSÉ, *et al.* **Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica**. 2006.

B. S. REYNALDO. **Uma visão sobre o balanço de energia e desempenho em veículos híbridos**. 2010. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

H. R. C. BERNARDO; C. B. DANIEL; G. V. SUZANA. **Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global**. BNDES.

F. R. MARIA. **Baterias de lítio-íon- Desafios e Oportunidades**. 2018. Fundação CPqD. Ministério da Defesa.

T. A. T. VITOR. **Avaliação de Eficiência Energética de quatro sistemas de propulsão em Veículos Leves**. Universidade Federal do Rio de Janeiro; Departamento de Engenharia Mecânica. 2017.

J. M. MICHAEL; N. S. HOWARD; D. B. DAISE; B. B. MARGARET. **Princípios da Termodinâmica para Engenharia**. Sétima edição. 2013.

A. Ç. YUNUS; A. B. MICHAEL. **Thermodynamics**. Ed. 5th. 2007.

B. C. ADILSON; M. K. LIANE; E. G. ANNELEISE; B. D. HENRIQUE; M. D. CHERYL. **Determinação do Poder Calorífico no Controle de Qualidade de Combustíveis Para Sistemas de Geração de Energia e Aquecimento Industrial**. XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 2009.

A. MURAT; M. ERKAN. **A permanent magnet alternator with increased power capability for hybrid electric vehicle applications**. ELSEVIER. 2015.

CARLOS A. DE OLIVEIRA; ANDREA ROSA. **Mecânica de automóveis – Motores de Combustão Interna – Álcool e Gasolina**. SENAI. 2003

DEPARTAMENTO DE FÍSICA DA UFPR -

<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap1/cap1-2.html>. Acesso em 19/10/2019.

J. M MICHAEL.; HOWARD N. S.; DAISE D. B.; MARGARET B. B.. **Princípios da Termodinâmica para Engenharia**. Sétima edição. 2013.

CHRIS MI, M. ABUL MASRUR - **Hybrid Electric Vehicles. Principles and Applications with Practical Perspectives**- Wiley. 2017

EHSANI, MEHRDAD; M. GAO, YIMIN; LONGO, STEFANO; EBRAHIMI, KAMBIZ.
Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. CRC Press. 2018

Página da KIA MOTORS. Site: <https://www.kia.com/us/en/optima-hybrid/specs>.
Acessado em: 20/10/2019

OSCAR P.R. VAN VLIET, THOMAS KRUIHOF, WIM C. TURKENBURG, ANDRE
P.C. FAAIJ. **Techno-economic comparison of series hybrid, plug-in
hybrid, fuel cell and regular cars.** Elsevier. 2010.

FABIO CRESCIMBINI; AUGUSTO DI NAPOLI, LUCA SOLERO; AND FEDERICO
CARICCHI; **Compact Permanent-Magnet Generator for Hybrid Vehicle
Applications.** IEEE.

Site: <https://omecanico.com.br/ed-300-hibridos-e-eletricos-carros-hibridos-em-sua-oficina-uma-realidade-proxima/>. Acessado em 23/10/2019.

Ford. Site: <https://www.ford.com.br/carros/fusion/>. Acessado em: 23/10/2019.

WILLARD W. PULKRABEK. **Engineering Fundamentals of the Internal
Combustion Engine.** Prentice Hall.

Página Engenheiro Jose Claudio:
<https://www.joseclaudio.eng.br/geradores/PDF/diesel2.pdf>. Acessado em: 20/10/2019.

SEBRAE. **Eficiência energética para pequenos negócios – motores elétricos.**
Sebrae. 2016

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO -ANP. Site: <http://www.anp.gov.br/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/sintese-do-comportamento-dos-precos-dos-combustiveis-semanal>. Acessado em: 23/10/2019.

AGÊNCIA NACIONAL DA ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Site:

<https://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>. Acessado em: 23/10/2019.

CALIFORNIA FULL CELL PARTNERSHIP. Site: <https://cafcp.org/content/cost-refill>. Acessado em: 23/10/2019.

FORD. Site: <https://www.ford.com.br/servico-ao-cliente/revisao-preco-fixo/fusion-hybrid/>. Acessado em: 23/10/2019

VAN WYLEN, GORDON J. **Fundamentos da Termodinâmica**, 6ª edição.

HUSAIN, IQBAL. **Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals**. 2011

KATRAŠNIK, TOMAZ. **Analytical framework for analyzing the energy conversion efficiency of different hybrid electric vehicle topologies**. 2009

ÇENGEL, YUNUS A.; BOLES, MICHAEL A. **Termodinâmica**. Sétima edição. 2013.

PINDYCK, ROBERT; RUBINFELD, DANIEL.; **Microeconomia**. 8ª Edição. Pearson. 2013.

BRITISH PETROLEUM. Site: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/oil.html.html#oil-reserves>. Acessado em: 03/11/2019.

U.S GEOLOGICAL SURVEY. Site: <https://pubs.usgs.gov/dds/dds-069/dds-069-ff/>. Acessado em: 03/11/2019.

MAYER, ROBSON; PÉRES, ADRIANO; OLIVEIRA, SÉRGIO. **Conversor cc-cc multifásico bidirecional em corrente não isolado aplicado a sistemas elétricos de tração de veículos elétricos e híbridos**. Universidade do Estado de Santa Catarina; Universidade Regional de Blumenau. 2016

Ford. Site: <https://www.ford.com.br/carros/fusion/>. Acessado em: 03/11/2019.

Página Medium. Site: <https://medium.com/pushtostart/the-fascinating-history-of-tesla-and-the-general-motors-ev1-f00e4af62f78>. Acessado em 04/12/2019

Blog Toyota. Site: <https://blog.toyota.co.uk/history-toyota-prius>. Acessado em 04/12/2019.

Página da Honda. Site: <https://global.honda/heritage/timeline/product-history/automobiles/1999Insight.html>. Acessado em 04/12/2019.

Página da Hyundai. Site: <https://www.hyundaiusa.com/sonata-hybrid/index.aspx?model=sonata-plug-in-hybrid&trim=pluginhybrid&year=2019>. Acessado em 04/12/2019.

Página Carro Elétrico. Site: <https://carroeletrico.com.br/blog/toyota-mirai/>. Acessado em 04/12/2019.

BRINKMAN; WANG; WEBER; DARLINGTON. **Well-to-Wheels Analysis of Advanced Fuel/Vehicle Systems — A North American Study of Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Criteria Pollutant Emissions**. 2005

ARSHAD et al. **A Cost Benefit Analysis Of Electric And Hybrid Electric Vehicles**. 2014

J. M. OGDEN. **Prospects for Hydrogen in the Future Energy System**. Institute of Transportation Studies, University of California, 2018.

M. E. CANES. **Economics of Hybrid Electric Vehicles**. 2006.

Página Fuel Economy. Site: fueleconomy.gov. Acessado em 05/12/2019