

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JULIO CESAR BORTOLINI RODRIGUES

**CRIAÇÃO DE UM TOOL BOX PARA O SOFTWARE ADVISOR
COM A ARQUITETURA PARALELA DE EIXOS SEPARADOS**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2021

JULIO CESAR BORTOLINI RODRIGUES ✉ 

**CRIAÇÃO DE UM TOOL BOX PARA O SOFTWARE ADVISOR
COM A ARQUITETURA PARALELA DE EIXOS SEPARADOS**

**CREATION OF A TOOL BOX FOR THE ADVISOR SOFTWARE
WITH THE PARALLEL ARCHITECTURE OF SEPARATE AXLES**

Dissertação apresentada como requisito
para obtenção do título de Mestrado em En-
genharia Elétrica da Universidade Tecnoló-
gica Federal do Paraná

Orientadora: Profa. Dra. Fernanda Cristina
Correa

PONTA GROSSA

2021



4.0 Internacional

Esta licença permite que outros remixem, adaptem e criem a partir do trabalho para fins não comerciais, desde que atribuam o devido crédito e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa**



JULIO CESAR BORTOLINI RODRIGUES

CRIAÇÃO DE UM TOOL BOX PARA O SOFTWARE ADVISOR COM A ARQUITETURA PARALELA DE EIXOS SEPARADOS

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Controle E Processamento De Energia.

Data de aprovação: 09 de Novembro de 2021

Prof.a Fernanda Cristina Correa, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Fabio Mazzariol Santiciolli, Doutorado - Faculdade de Tecnologia de Campinas - Fatec

Prof Frederic Conrad Janzen, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 09/11/2021.

Dedico este trabalho a minha família e aos
meus amigos, pelos momentos de
ausência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela vida e pelas oportunidades que tem me proporcionado.

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem. Certamente esses parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase da minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e da minha gratidão.

Agradeço aos meus pais Antonio Rodrigues (in memoriam) e Irene Lucia Bortolini Rodrigues (in memoriam), pelo amor, atenção e apoio dedicados a mim.

Agradeço aos meus irmãos Raquel Bortolini Rodrigues e Claudio Bortolini Rodrigues, por todo o apoio e incentivo, sem o qual não conseguiria concluir este mestrado.

A orientadora professora Dr.^a Fernanda Cristina Correa, pela paciência e dedicação nos momentos difíceis, e por todo o conhecimento repassado.

Agradeço aos amigos conquistados durante o curso, pelos momentos de descontração, conhecimentos compartilhados e amizade dedicada.

Agradeço pela contribuição direta e indireta dos demais professores e funcionários do Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa.

Agradeço aos colegas de trabalho pelo apoio e amizade.

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Obrigado mesmo por tudo!!!

“Aos outros dou o direito de ser como são. E a mim, dou o dever de ser cada dia melhor.” (**Chico Xavier**).

RESUMO

BORTOLINI RODRIGUES, Julio Cesar. **CRIAÇÃO DE UM TOOL BOX PARA O SOFTWARE ADVISOR COM A ARQUITETURA PARALELA DE EIXOS SEPARADOS** . 2021. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná , Ponta Grossa, 2021.

Diante de fatores como aquecimento global, aumento da poluição, necessidade de locomoção, entre outros, os governos em conjunto com a sociedade promovem regulamentações e programas para reduzir os impactos da sociedade sobre o meio ambiente. Dentre as medidas adotadas, podem ser citados os esforços realizados pelos cientistas em pesquisas para desenvolver armazenadores de energia com maior densidade de energia e maior densidade de potência, buscando uma solução menos impactante ao meio ambiente. Neste trabalho, o objetivo é criar uma *tool box* para o *software* ADVISOR com a arquitetura de um Veículo elétrico híbrido paralelo de eixos separados. Foram realizadas mudanças no diagrama de blocos da arquitetura *PARALLEL_defaults_in*, presente na biblioteca do referido software, mudanças estas que possibilitaram a implementação do objetivo proposto neste trabalho. Durante a execução do presente projeto surgiu o problema do não aproveitamento da energia oriunda da frenagem regenerativa, para solução desta adversidade foram necessários ajustes no diagrama de blocos responsável pelas equações relacionadas à regeneração de energia por meio da frenagem. As simulações foram realizadas submetendo cada uma das duas estruturas veicular ao ciclo de condução urbano NBR6601, tendo em vista que cada arquitetura é capaz de cumprir os parâmetros de projeto. Os resultados demonstraram uma maior eficiência energética para o VEH Paralelo-ES, apresentando um ponto positivo para esta configuração.

Palavras-chave: Veículo Elétrico Híbrido. Arquitetura. ADVISOR. Simulação. Eficiência Energética.

ABSTRACT

BORTOLINI RODRIGUES, Julio Cesar. **CREATION OF A TOOL BOX FOR THE ADVISOR SOFTWARE WITH THE PARALLEL ARCHITECTURE OF SEPARATE AXLES** . 2021. 96 p. Thesis (Master's Degree in Electrical Engineering) — Federal University of Technology — Paraná, Ponta Grossa, 2021.

Faced with factors such as global warming, increased pollution, the need for transportation, among others, governments and society together promote regulations and programs to reduce society's impacts on the environment. Among the adopted initiatives, we can mention the efforts made by scientists in the research to develop energy storage systems with higher energy density and higher power density, and also seeking a solution that is less impactful on the environment. In this work, the objective is to create a toolbox for the ADVISOR software with the architecture of a parallel hybrid electric vehicle with separate axles. Changes were made to the block diagram of the PARALLEL_defaults_in architecture, present in the library of that software, changes that enabled the implementation of the objective proposed in this work. During the execution of this project, the problem of not using energy from regenerative braking arose. To solve this adversity, adjustments to the block diagram responsible for the equations related to energy regeneration through braking were necessary. The simulations were carried out by submitting each of the two vehicular structures to the NBR6601 urban driving cycle, considering that each architecture is capable of complying with the design parameters. The results showed a greater energy efficiency for the VEH Parallel-ES, presenting a positive point for this configuration.

Keywords: Hybrid Electric Vehicle. Architecture. ADVISOR. Simulation. Energy Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Oscilação no valor do barril do petróleo. | 17 |
| Figura 2 – Bateria de Volta. | 29 |
| Figura 3 – Primeiro veículo de Ferdinand Porsche, conhecido como P1. | 31 |
| Figura 4 – Sistema de motorização elétrica diretamente nas rodas do veículo. | 31 |
| Figura 5 – Primeiro veículo de passageiros 4x4 do mundo. | 32 |
| Figura 6 – Carro elétrico-gasolina Krieger. | 32 |
| Figura 7 – Lohner-Porsche Mixte. | 33 |
| Figura 8 – “ <i>Le Jamais Contente</i> ”. | 34 |
| Figura 9 – Evolução de Vendas de Veículos Híbridos. | 38 |
| Figura 10 – Conceito de VE com baterias. | 40 |
| Figura 11 – Configurações de VE’s puros. | 42 |
| Figura 12 – Classificação dos VEH’s quanto ao grau de hibridização. | 43 |
| Figura 13 – Veículo Híbrido em Configuração Série. | 45 |
| Figura 14 – Veículo Híbrido em Configuração Paralela. | 46 |
| Figura 15 – Veículo Híbrido em Configuração Paralela-SA. | 46 |
| Figura 16 – Veículo Híbrido em Configuração Paralela-ES. | 47 |
| Figura 17 – Veículo Híbrido em Configuração Série-Paralelo. | 47 |
| Figura 18 – Descrição dos 4 tempos do motor de ciclo Otto. | 48 |
| Figura 19 – Curvas de Potência e Torque do MCI 1.0L - 44kW. | 49 |
| Figura 20 – Mapas de Eficiência e de Consumo de combustível do MCI 1.0L - 44kW. | 49 |
| Figura 21 – Densidade energética de alguns Tipos de Baterias e da Gasolina. | 55 |
| Figura 22 – Interfaces de Potência para Escolha do ME. | 56 |
| Figura 23 – Classificação Geral dos Motores. | 58 |
| Figura 24 – Comportamento de Torque e Potência de um ME. | 59 |
| Figura 25 – Disposição normalizada dos eixos de um automóvel (SAE J670). | 60 |
| Figura 26 – Forças atuantes em um veículo. | 61 |
| Figura 27 – Arrasto de forma na resistência aerodinâmica. | 65 |
| Figura 28 – Coeficientes de arrasto em função da forma do veículo. | 66 |
| Figura 29 – Rampa com inclinação excepcionalmente grande (10° ou 18%) em um trecho da Rodovia SC 480 na Serra do Rio do Rastro. | 67 |
| Figura 30 – Arquitetura VEH Paralelo Eixos Separados | 74 |
| Figura 31 – Sistema de Transmissão da Propulsão Elétrica | 75 |
| Figura 32 – Diagrama de blocos híbrido paralelo do ADVISOR | 76 |
| Figura 33 – Diagrama de blocos do modelo do VEH paralelo de eixo separado modificado no ADVISOR | 76 |
| Figura 34 – Bloco que representa as rodas e os eixos | 77 |
| Figura 35 – Diagrama de seleção do eixo de tração | 77 |
| Figura 36 – Diagrama de blocos do bloco de controle de ativação do sistema de tração elétrica | 78 |
| Figura 37 – Diagrama de blocos do bloco do diferencial | 79 |
| Figura 38 – Diagrama de blocos da caixa de redução do sistema de tração elétrica | 79 |
| Figura 39 – Diagrama de blocos com destaque para Bloco de Controle parte elétrica | 80 |
| Figura 40 – Diagrama de blocos com destaque para bloco <i>Backward Model</i> | 81 |
| Figura 41 – Diagrama de blocos interno do bloco <i>Backward Model</i> | 81 |
| Figura 42 – Diagrama de blocos do bloco de Ajuste da recarga | 81 |

| | |
|--|----|
| Figura 43 – Diagrama de blocos do controle da recarga | 82 |
| Gráfico 1 – Ciclo de Condução CYC_UDDS e Deslocamento. | 84 |
| Gráfico 2 – Percentual de exposição de velocidade do CYC_UDDS. | 85 |
| Gráfico 3 – Torque no eixo traseiro. | 86 |
| Gráfico 4 – Torque no eixo dianteiro. | 87 |
| Gráfico 5 – Sinal no Bloco Responsável pela Recarga. | 88 |
| Gráfico 6 – SOC VEH Paralelo ES | 88 |
| Gráfico 7 – SOC VEH Paralelo | 88 |
| Gráfico 8 – Gráfico ciclo VEH Paralelo ES | 89 |
| Gráfico 9 – Gráfico ciclo VEH Paralelo | 89 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Distribuição das emissões de poluentes | 16 |
| Tabela 2 – Efeitos nocivos principais poluentes veiculares locais | 16 |
| Tabela 3 – Principais Tipos de Baterias de Íon-Lítio | 54 |
| Tabela 4 – Máquinas Elétricas Rotativas | 56 |
| Tabela 5 – Parâmetros de um veículo nacional compacto | 82 |
| Tabela 6 – Especificações Técnicas | 83 |
| Tabela 7 – Definição dos componentes | 85 |
| Tabela 8 – Consumo e Emissões das Simulações. | 89 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

SIGLAS

| | |
|-----------------|--|
| BMZ | Ministério Federal de Cooperação Econômica e Desenvolvimento da Alemanha |
| CA | Corrente Alternada |
| CC | Corrente Contínua |
| CO | Monóxido de Carbono |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| COFINS | Contribuição para Financiamento da Seguridade Social |
| EVT | Transmissão Elétricamente Variável |
| GEE | Gases do Efeito Estufa |
| HC | Hidro Carboneto |
| ICMS | Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços |
| IPVA | Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores |
| MCI | Motor de Combustão Interna |
| ME | Motor Elétrico |
| MP | Material Particulado |
| NBR | Norma Técnica Brasileira |
| NMHC | Hidrocarbonetos não metanos |
| NO _x | Óxido de Nitrogênio |
| O ³ | Ozônio |
| PIS | Programas de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público |
| PNGV | <i>Partner Ship for a New Generation Vehicles</i> |
| RCHO | Poluentes atmosféricos aldeídos |
| SO _x | Óxido de Enxofre |
| SOC | Estado de Carga |
| TTR | <i>Through-The-Road</i> |
| VE | Veículo Elétrico |
| VE's | Veículos Elétrico |
| VEH | Veículo Elétrico Híbrido |
| VEH's | Veículos Elétrico Híbrido |

ACRÔNIMOS

| | |
|-----------|--|
| ADVISOR | <i>Advanced Vehicle Simulator</i> |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| Proconve | Projeto Sistemas de Propulsão Eficiente |
| PROMOB-e | Programa de Controle de Emissões Veiculares para veículos pesados |
| ROTA 2030 | Programa Federal destinado à cadeia automotiva para melhoria de eficiência |
| SAE | <i>Society of Automotive Engineers</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

| | | |
|-------------|---|---------------------|
| a | Aceleração do veículo | [m/s] |
| A_f | Área frontal do veículo | [m ²] |
| C_D | Coefficiente aerodinâmico | |
| CG | Centro de gravidade | [m] |
| DOH | Grau de hibridização | |
| E_{out} | Energia consumida das baterias | [Wh] |
| F_g | Força de resistência ao aclave | [N] |
| F_r | Força de resistência ao rolamento | [N] |
| f_r | Coefficiente de resistência ao rolamento | |
| F_t | Força de tração | [N] |
| F_w | Força de resistência aerodinâmica | [N] |
| g | Aceleração da gravidade | [m/s ²] |
| M | Massa do veículo | [kg] |
| P_t | Potência de tração | [W] |
| P_{reg} | Potência regenerada | [W] |
| P_{tot} | Potência total consumida | [W] |
| Pot_{MCI} | Potência MCI | [W] |
| Pot_{ME} | Potência ME | [W] |
| t_a | Tempo de aceleração | [s] |
| V | Tensão | [volts] |
| $v(t)$ | Velocidade instantânea do veículo | [m/s] |
| V_f | Velocidade final do veículo | [m/s] |
| V_v | Velocidade do veículo | [m/s] |
| V_w | Componente da velocidade do vento da direção do veículo (positiva na mesma direção do veículo) | [m/s] |

LETRAS GREGAS

| | | |
|-------------|---|----------------------|
| ξ | Fator de frenagem regenerativa | |
| α | Inclinação da superfície | [deg] |
| δ | Coefficiente do momento de inércia | |
| η_m | Rendimento do motor | [%] |
| η_t | Rendimento total da transmissão | [%] |
| η_{cc} | Rendimento do controlador/conversor de potência | [%] |
| ρ_a | Densidade do ar | [kg/m ³] |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | ESTADO DA ARTE | 21 |
| 1.2 | MOTIVAÇÃO | 24 |
| 1.3 | OBJETIVOS | 25 |
| 1.3.1 | Objetivo Geral | 25 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos | 25 |
| 1.4 | JUSTIFICATIVA | 25 |
| 1.5 | ESCOPO DA DISSERTAÇÃO | 26 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 28 |
| 2.1 | HISTÓRIA DO VEÍCULO ELÉTRICO | 28 |
| 2.2 | DEFINIÇÕES DO VEÍCULO ELÉTRICO | 39 |
| 2.2.1 | Veículos Elétricos Puros | 39 |
| 2.2.2 | Veículos Elétricos Híbridos | 41 |
| 2.2.2.1 | Grau de Hibridização | 43 |
| 2.2.2.1.1 | <i>Micro Híbrido</i> | 44 |
| 2.2.2.1.2 | <i>Híbrido Moderado a Médio</i> | 44 |
| 2.2.2.1.3 | <i>Híbrido Completo</i> | 44 |
| 2.2.2.2 | Configurações dos VEH's | 45 |
| 2.2.2.2.1 | <i>Híbrido Série</i> | 45 |
| 2.2.2.2.2 | <i>Híbrido Paralelo</i> | 45 |
| 2.2.2.2.3 | <i>Híbrido Série-Paralelo</i> | 47 |
| 2.3 | MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI) | 47 |
| 2.4 | TRANSMISSÃO | 50 |
| 2.5 | ARMAZENADORES DE ENERGIA | 50 |
| 2.5.1 | Baterias | 51 |
| 2.5.1.1 | Tipos de Baterias | 52 |
| 2.5.1.1.1 | <i>Chumbo-Ácido (PbA)</i> | 52 |
| 2.5.1.1.2 | <i>Níquel</i> | 52 |
| 2.5.1.1.3 | <i>Íon-Lítio</i> | 53 |
| 2.5.1.1.4 | <i>Zinco-Ar</i> | 53 |
| 2.6 | MÁQUINAS ELÉTRICAS | 55 |
| 2.6.1 | Motor de Indução (CA) | 56 |
| 2.6.2 | Motor de Relutância Comutada (CA) | 57 |
| 2.6.3 | Motor de Imã Permanente sem Escovas (CC) | 57 |
| 2.6.4 | Motor de Corrente Contínua com Escovas (CC) | 57 |
| 2.7 | ACIONAMENTO DOS MOTORES ELÉTRICOS | 58 |
| 2.8 | DINÂMICA VEICULAR | 59 |
| 2.8.1 | Forças de Resistência ao Movimento do Veículo | 63 |
| 2.8.1.1 | Resistência ao rolamento | 63 |
| 2.8.1.2 | Resistência aerodinâmica | 64 |
| 2.8.1.3 | Resistência ao aclave | 65 |
| 2.8.1.4 | Aceleração | 67 |
| 3 | CONCEPÇÃO E DEFINIÇÃO DO SISTEMA | 71 |
| 3.1 | MATLAB | 71 |
| 3.1.1 | ADVISOR (<i>Advanced Vehicle Simulator</i>) | 72 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2 | MODIFICAÇÕES NO ADVISOR | 74 |
| 3.3 | PARÂMETROS | 80 |
| 3.4 | CICLO DE CONDUÇÃO | 83 |
| 3.5 | SISTEMAS DE TRAÇÃO | 84 |
| 3.5.1 | Definições | 85 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 86 |
| 5 | CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS | 90 |
| | REFERÊNCIAS | 92 |

1 INTRODUÇÃO

A mobilidade é essencial para a sociedade, os veículos leves são a principal alternativa utilizada para deslocamentos a trabalho ou lazer. A maior concentração de veículos para suprir essa necessidade encontra-se nos grandes centros urbanos. Diante das constantes catástrofes ambientais, voltaram-se os olhares mundiais para a interferência do homem sobre o meio ambiente, a qual está ocasionando diversos desequilíbrios ao ecossistema. Uma das fontes desse problema é o uso de veículos que possuem como fonte propulsora o motor a combustão interna (MCI), pois emitem diversos gases poluentes, os quais são fontes responsáveis pelo aumento do efeito estufa. Uma das consequências do efeito estufa é o aumento da temperatura média do planeta, outro problema oriundo dos poluentes é o aumento dos problemas respiratórios na população, e diversos outros problemas (MATTOS, 2001).

Em Brandão, Albuquerque e Fialho (2020) os autores classificam os veículo em duas categorias, veículos leves e veículos pesados. Os automóveis, comerciais leves e motocicletas/similares estão inseridos na classificação de veículos leves. Enquanto que os micro-ônibus, ônibus e caminhões estão inseridos na classificação de veículos pesados.

Para efeito comparativo, é mostrada na Tabela 1 a contribuição na emissão relativa de CO (monóxido de carbono), NO_x (óxidos de nitrogênio), MP (materiais particulados), NMHC (hidrocarbonetos não metanos), RCHO (poluentes atmosféricos aldeídos) dos veículos automotores nos centros urbanos brasileiros, separados por categoria, onde se observa que os automóveis de passeio são responsáveis por mais da metade das emissões de CO, seguidos pelas motocicletas e comerciais leves. Os veículos pesados apresentaram maior participação na emissão de NO_x e MP. Com relação à emissão de NMHC os automóveis tiveram maior emissão, seguidos pelos caminhões e motocicletas. Os automóveis e comerciais leves foram os responsáveis pela emissão de RCHO.

Na Tabela 2 são mostrados outros gases liberados pelo tubo de escapamentos dos veículos, os poluentes locais. Eles são prejudiciais à saúde e ao meio ambiente tanto quanto o CO₂, possuindo concentração diferente para cada categoria de combustível queimado pelo veículo.

Os poluentes locais afetam especificamente as áreas de abrangência da ope-

Tabela 1 – Distribuição das emissões de poluentes

| Categoria | CO | NO_x | MP | NMHC | RCHO |
|------------------|-----------|-----------------------|-----------|-------------|-------------|
| Automóvel | 54,3% | 6% | 3,8% | 39,7% | 85,2% |
| Comerciais Leves | 12% | 8,6% | 2,6% | 11,1% | 14,8% |
| Motocicletas | 20,1% | 0,6% | 0,6% | 21,2% | |
| Caminhão | 9,7% | 62,8% | 74,3% | 21,4% | |
| Ônibus | 3% | 16,9% | 12,9% | 5,1% | |
| Micro-ônibus | 0,9% | 5,1% | 5,9% | 1,5% | |

Fonte: Adaptado de Brandão, Albuquerque e Fialho (2020).

ração do transporte. O transporte motorizado, com base na queima de combustíveis fósseis, é responsável pela emissão de vários poluentes nocivos à saúde e degradam o ambiente urbano, com destaque para o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), os materiais particulados (MP), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e os óxidos de enxofre (SO_x). Na Tabela 2 estão descritos os principais efeitos nocivos da alta concentração destes poluentes.

Tabela 2 – Efeitos nocivos principais poluentes veiculares locais

| Poluente | Impacto. |
|-----------------|--|
| CO | Atua no sangue reduzindo sua oxigenação, podendo causar morte após determinado período de exposição. |
| NO _x | Formação de dióxido de nitrogênio e na formação do <i>smog</i> * fotoquímico e chuva ácida. É um precursor do ozônio. |
| HC | Combustíveis não queimados ou parcialmente queimados formam o <i>smog</i> * e compostos cancerígenos. É um precursor do ozônio. |
| MP | Pode penetrar nas defesas do organismo, atingir os alvéolos pulmonares e causar irritações, asma, bronquite e câncer de pulmão. Sujeira e degradação de imóveis próximos aos corredores de transporte. |
| SO _x | Precursor do ozônio, formando a chuva ácida e degradando vegetação e imóveis, além de provocar uma série de problemas de saúde. |

*efeito {smog} é a formação de uma névoa densa devido à grande concentração de ozônio (O³) no ar.

Fonte: Carvalho (2011).

Outro ponto a se destacar é com relação às oscilações no valor do barril do petróleo, sendo que quando o valor deste reduz é muito difícil ocorrer redução no valor do produto para o consumidor final. Na Figura 1 há o demonstrativo da oscilação do valor do barril do petróleo. Sendo que, nos períodos de crise econômica é comum ocorrer elevação do preço do petróleo, conforme se observam as altas no período de 2010 a 2013, quando os valores passaram de US\$ 90,00 (noventa dólares) o barril. No entanto, a partir de 2014 houve redução no valor. Porém, o valor nas bombas de combustível para o consumidor final não acompanhou tal redução. Havendo redução do preço na bomba no ano de 2020, no início da pandemia SARS COV 2 (COVID-19) devido à redução do consumo, mas ao ser normalizado o consumo o preço do combustível na

bomba voltou a subir. No entanto, o custo do barril do petróleo está menor que no período de 2010 a 2013 e o valor do combustível na bomba está muito maior.

Vale destacar que, as maiores reservas de petróleo encontram-se em áreas de conflito como o Oriente Médio, por exemplo, e que estas são das principais fontes de perturbações em relação ao preço do barril de petróleo.

Figura 1 – Oscilação no valor do barril do petróleo.



Fonte: TrendingView (2021).

Diante do exposto anteriormente a partir da década de 1970, a opinião pública voltou-se para os problemas ambientais. Nesse contexto os governos dos países desenvolvidos investiram em programas de incentivo ao veículo elétrico no intuito de reduzir as emissões de gases poluentes, no entanto, os programas não foram bem-sucedidos (BARAN, 2012).

Contudo, diferente do que muitas pessoas acreditam, a tecnologia dos automóveis elétricos e híbridos não representa uma inovação tecnológica recente. Embora haja certamente avanços tecnológicos importantes nos veículos elétricos (VE) atuais, como as baterias e toda a tecnologia digital presente nos carros modernos, em essência o conceito básico se mantém. Ou seja, não houve mudanças radicais nos motores elétricos de hoje, havendo algumas melhorias relacionadas ao processo de reaproveitamento da energia cinética gerada pelo movimento do veículo por meio da frenagem regenerativa (HOYER, 2008; BARAN, 2012; SANTOS, E. P. dos; ZUBEN, 2000).

Segundo Hoyer (2008) e Baran (2012), no final do século XIX os veículos elétricos dividiam o mercado norte-americano de automóveis com os veículos a vapor. Sendo que os VE's eram considerados tecnologicamente superiores aos movidos a vapor e também aos propulsionados com motor interno a combustão (MCI), pelo fato de utilizarem componentes parecidos com os dos bondes elétricos, que eram o principal meio de transporte público da época. Neste período, a capacidade de armazenamento das baterias foi considerada o ponto fraco dos veículos elétricos, pois limitavam a autonomia.

Ainda de acordo com Hoyer (2008) e Baran (2012), outros fatores que alavancaram as vendas dos veículos a gasolina, fazendo os VE's serem preteridos, foi o melhor desempenho, relativo à autonomia, dos automóveis com MCI, ao aumento da rede de distribuição de gasolina, a facilidade de distribuição de combustível líquido em pequenos galões, entre outros fatores. Também a maneira agressiva de mercado instituída por Henry Ford, com a produção em larga escala por meio de linha de montagem. Os fabricantes de VE por outro lado, preferiam produzir menos mas com maior qualidade. De fato, os VE's já foram fortes concorrentes dos automóveis de combustão interna, mas, por razões já detalhadas, foram preteridos e tiveram, desde os anos 1930, participação marginal na história do automóvel (BARAN, 2012).

Desde o lançamento do Toyota Prius, em 1997, verifica-se no mercado norte-americano um número crescente de lançamentos de automóveis híbridos e, mais recentemente, de veículos puramente elétricos (BARAN, 2012; SANTOS, E. P. dos; ZUBEN, 2000). Na atualidade, principalmente com o advento das preocupações ambientais, os VE's estão recebendo muitos incentivos por entender-se que podem ser uma alternativa para a minimização dos danos ocasionados por atividades humanas (CASTRO; FERREIRA, T. T., 2010).

Portanto, considerando os argumentos apresentados, como custo, autonomia e eficiência devem-se avaliar essas variáveis e procurar projetar um sistema para aperfeiçoar, reduzindo perdas, aumentando a autonomia e reduzindo custos, em resumo, aumentar a eficiência do conjunto. Desta maneira os veículos elétricos poderão tornar-se competitivos frente aos modelos propulsionados por MCI.

Diante das problemáticas elencadas são necessárias medidas para redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE). Neste contexto os VEH são uma opção potencial para o cenário automotivo mundial. A proposta do VEH é uma solução

intermediária entre os veículos convencionais com propulsão a MCI e os VE's.

Para minimizar os custos desta tecnologia e promover a disseminação desses veículos, é importante promover ações de incentivo. Os VE's e os VEH's não possuíam no Brasil, até outubro de 2015, classificação específica e por isso não recebiam ações de incentivo. Tal classificação implicava em uma alíquota de importação máxima de 35% aplicável sobre os veículos do seu valor total, para sua entrada no Brasil. O ministério da fazenda elaborou, em 2010, um projeto para redução da alíquota para os VE's e para os VEH's, mas a análise da proposta foi adiada. O preço final destes veículos no Brasil se tornava ainda mais elevado devido à aplicação de outros impostos como ICMS, em torno de 18%, de tributações sociais como o PIS/COFINS, (11,6% sobre o faturamento bruto), e ainda o imposto do IPVA, que pode atingir 4% do valor do veículo (BRAVO, MEIRELLES e GIALLONARDO, 2014).

Isto posto, é de extrema importância que o governo promova a elaboração e aprovação de projetos de lei com medidas públicas que beneficiem os usuários destes veículos. Segundo Castro e Tiago Toledo Ferreira (2010) há pelo menos cinco medidas governamentais de incentivo à disseminação dos VE's e VEH's: bônus aos compradores, restrições à utilização de veículos convencionais, desconto em tributos, auxílio à pesquisa e desenvolvimento e infraestrutura. O elevado preço dos atuais VE's e dos VEH's acaba dificultando sua difusão no mercado e, para driblar esse entrave, alguns países têm adotado medidas de subsídio, fornecendo bônus aos compradores. No Brasil ainda não existem ações de incentivo que concedam bônus aos compradores, mas EUA e Japão são bons exemplos desta prática, concedendo bônus de US\$ 7.500,00 e US\$ 10.000,00, respectivamente.

Algumas medidas de restrição ao uso de veículos convencionais podem beneficiar os proprietários de VE e VEH. Por exemplo, Paris pretende reduzir a zero a circulação de veículos propulsionados por motores de combustão a diesel. Na Noruega, os veículos elétricos representam 25% das vendas, este país tem uma proposta para proibir a circulação de qualquer veículo que não seja de natureza elétrica até 2025. A Holanda estuda a possibilidade de implementar a mesma proposta da Noruega. No Brasil, os VE's e VEH's estão isentos do rodízio municipal na cidade de São Paulo, conforme estabelecido pela Lei nº 12.490/97, complementada pela Lei nº 14.751/08, é regulamentado pelos Decretos 58.584/18 e 58.604/19 (SILVA, R.; PIRES, 2016).

Outras medidas que auxiliam para tornar o uso destes veículos atraente são a

concessão de descontos em tributos, regulações quanto ao uso de veículos convencionais com MCI, infraestrutura de recarga para os VE's e VEH's *plug-in*, entre outras. Como exemplo, na Noruega o governo concedeu redução e isenção de impostos para VE's e VEH's, também sobretaxou os veículos com MCI proporcionalmente à emissão de gases do efeito estufa, o preço da gasolina é bastante elevado, além de outras políticas de incentivo aos VE's e VEH's em contrapartida regulação quanto aos veículos com MCI (BORBA, 2020).

No Brasil um projeto que encontra-se em destaque é o Projeto Sistemas de Propulsão Eficiente (PROMOB-e). Este programa é executado pelo Ministério da Economia do Brasil em cooperação com o Ministério Federal de Cooperação Econômica e Desenvolvimento da Alemanha (BMZ), com o objetivo de consolidar a mobilidade elétrica no país (BORBA, 2020).

Em sete estados brasileiros os proprietários de VE's são isentos de impostos, outros três estados possuem alíquota diferenciada. Existem algumas políticas públicas em discussão com relação aos postos de recargas de baterias e ao fornecimento de energia para estes postos (BORBA, 2020).

Outro programa de destaque em vigor no Brasil de incentivo à indústria automotiva nacional, Lei Federal 17.755/18 (ROTA 2030), programa este com duração prevista para 15 anos com três ciclos de investimentos programados. De acordo com o programa ROTA 2030 são estabelecidos alguns requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos novos, sejam eles importados ou produzidos no país, tais como: melhoria em segurança, redução de consumo e emissão de poluentes. Este programa visa beneficiar não somente as montadoras como também as fábricas de auto peças para uso no país ou exportação. Ainda, as empresas cadastradas no programa poderão deduzir impostos de renda de pessoa jurídica e contribuição social sobre o lucro líquido no mesmo valor que for aplicado em P&D (FRANCO et al., 2020; BORBA, 2020).

De acordo com Franco et al. (2020) as principais propostas do programa são:

- Recuperação da base de fornecedores, para reestruturar o setor;
- Localização de tecnologia, para inserir o Brasil na rota das principais tecnologias;
- Relações trabalhistas, favoráveis à reforma trabalhista para modernizar as relações de trabalho e atrair investimentos ao setor;
- Eficiência energética, novas metas de eficiência;

- Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), as empresas que aderirem ao programa e investirem em P&D terão incentivos fiscais;
- Segurança, inserção de novos sistemas e recursos de segurança nos veículos;
- Inspeção veicular, programa para reduzir o número de acidentes e emissões;
- Logística, mudar o sistema logístico para melhorar a competitividade; e
- Sistema tributário, simplificar o sistema tributário para atrair investimentos ao setor.

Como exposto acima, o programa ROTA 2030 de certa maneira está ajudando a incentivar a hibridização e eletrificação dos veículos no Brasil.

Ainda, outro ponto positivo a ser observado com relação ao Brasil, é que a matriz energética do país é constituída predominantemente, quase 80%, por fontes renováveis, fato este muito importante no objetivo de redução na emissão de poluentes (SILVA, R.; PIRES, 2016).

1.1 ESTADO DA ARTE

As pesquisas relacionadas à possíveis melhorias nos sistemas de tração, gerenciamento de energia, recarga de sistemas de armazenamento, entre outros, relacionados aos VEH's encontra-se na atualidade bastante motivadas devido às políticas públicas de redução de emissão de poluentes bem como para redução de consumo de combustíveis. Estes incentivos vêm por meio de programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D), e por meio de legislação restringindo a quantidade de emissões e consumo de combustível, um exemplo dessas políticas é o programa ROTA 2030 do governo brasileiro.

Nesta temática, serão apresentados alguns exemplos de pesquisa publicados no meio acadêmico.

Em Anselma et al. (2019) os autores desenvolveram uma pesquisa sobre os VEH's de arquitetura paralela, com o objetivo de demonstrar o potencial em economia de combustível e na redução de emissão de poluentes. Os pesquisadores escolheram duas arquiteturas de VEH's paralelo para aprofundar as análises. Eles chegaram à conclusão de que os VEH's de configuração paralela possuem grande potencial, pois apresentam melhoria na condição de dirigibilidade, significativa redução de emissão de poluentes e consumo de combustível. Um dos pontos fracos mencionados é questão

do custo, mas que se considerar a vida útil do veículo este custo pode ser absorvido pela economia de combustível.

Os pesquisadores em Chen et al. (2019) propuseram o estudo de um sistema de transmissão para VEH's, onde avaliaram os resultados da mudança de localização da caixa de marchas e a relação de redução da transmissão. Chegaram à conclusão que um projeto com localização ideal da caixa de marchas aliado a um conjunto de redução adequado do sistema de transmissão pode melhorar de forma considerável o desempenho de um VEH paralelo.

Em Gujarathi, Shah e Lokhande (2017) os autores realizaram a conversão de um veículo convencional para um VEH. Eles utilizaram estratégia de controle usando lógica *FUZZY* e compararam com estratégia de controle *on-off*. Após analisar os resultados comparando com um veículo convencional, concluíram que a lógica *FUZZY* proporciona redução na emissão de poluentes, e que a estratégia *on-off* favorece na redução de consumo de combustível, e que o VEH proporciona redução na emissão de poluentes e no consumo de combustível, porém isso está atrelado à estratégia de controle utilizada.

Os pesquisadores em Kapadia et al. (2017) realizam o estudo comparativo entre duas arquiteturas de VEH's, pois como descrevem no artigo existe a necessidade de atender diferentes tipos de consumidores, alguns precisam maior capacidade de carga, outros querem maior economia de combustível, mas ambos precisam estar em conformidade com os requisitos regulatórios. Ao analisar os resultados de simulações os autores consideraram que a arquitetura *Power Split*, configuração paralela que ocorre a conexão entre os sistemas de tração por meio do solo, não é adequada para atender as necessidade de um veículo grande que precise carregar carga, e que as arquiteturas a serem implementadas devem ser cuidadosamente avaliadas com o uso de cada setor de transporte.

Considerando um VE com tração independente os pesquisadores em Sun et al. (2016) propõem uma estratégia de controle do sistema de frenagem integrada entre o freio mecânico e o freio motor utilizado na frenagem regenerativa. Utilizaram o modo composto híbrido, o modo paralelo e o modo hidráulico de controle de frenagem. Concluindo que o modo composto paralelo apresentou elevada precisão preditiva em grande escala do estado de carga das baterias (SOC), o modo composto híbrido apresentou melhor precisão de previsão no nível de SOC, sendo efetivamente eficazes os sistemas de controle de regeneração de energia.

Em Wang, Guo e Fuyuan Yang (2015) os autores propuseram uma arquitetura para um VEH, onde o sistema de tração é constituído de forma híbrido-paralelo em série com tração nas quatro rodas. Sendo conectado um motor ao diferencial do eixo traseiro e uma unidade de alimentação auxiliar conectada ao eixo dianteiro por meio de uma embreagem. Os pesquisadores compararam o experimento com uma arquitetura híbrida coaxial com divisão de potência. Apresentaram que o sistema proposto híbrido série-paralelo com tração nas quatro rodas tem maior eficiência para recuperar energia por meio da frenagem regenerativa. Relatam ainda que é necessário um sistema de gerenciamento do sistema de armazenamento mais robusta e aprimorada.

Utilizando diferentes modos de operação, em Yalian Yang et al. (2016) os pesquisadores estudaram onze modos para alcançar os melhores resultados em termos de economia de combustível. Foi utilizado um sistema de acoplamento de velocidade, no qual é possível alternar entre os modos de VE, três modos de frenagem regenerativa, um modo de partida de motor (*Start-Stop*), um modo de transmissão eletricamente variável (EVT), um modo VEH paralelo, um modo apenas MCI e três modos de carregamento. Foram utilizadas duas arquiteturas para elaborar os estudos e comparar os rendimentos e eficiência. Após análise dos dados os autores concluíram que o sistema proposto pode gerar uma economia de até 13% no consumo de combustível.

Alguns trabalhos foram desenvolvidos com o objetivo de apresentar metodologias para seleção da melhor configuração do *powertrain* de VEH's *plug-in*, como em Zhou, Qin e Hu (2017) os autores realizaram simulações computacionais para avaliar o desempenho das configurações dos sistema de propulsão de diferentes situações de *trade-off*, solucionando o problema de otimização do controle físico integrado do *powertrain* do VEH *plug-in*. No trabalho foi apresentado um projeto multi-objetivo integrado de estratégia de dimensionamento do *powertrain*, aplicado nas arquiteturas série, paralelo (P2), divisão de potência de saída e multi-modo de *powertrain*. Os pesquisadores descrevem que a configuração P2 com o dimensionamento ideal dos componentes proporciona melhoria na capacidade de aceleração, na configuração de divisão de potência com dimensionamento ideal alcança melhor eficiência no consumo de energia elétrica e ainda na economia de combustível.

Com base nos estudos relacionados aos VEH's paralelo de eixos separados em Zulkifli et al. (2015) os autores avaliaram uma variação desta configuração, onde os ME's são colocados diretamente nas rodas denominados *In-Wheel*. A conexão entre os

eixos ocorre por meio da estrada (*TTR-through-the-road*), sendo o veículo denominado híbrido *TTR In-Wheel*. Nesta configuração as modificações necessárias em um veículo convencional para transformar em híbrido são mínimas. Os pesquisadores descrevem que ocorre melhoria na disponibilidade de torque, redução de consumo de combustível, melhoria na regeneração de energia por meio da frenagem regenerativa, redução dos níveis de emissão de poluentes, mínima mudança física nos veículos hibridizados, entre outras vantagens.

1.2 MOTIVAÇÃO

Há alguns fatores adversos à popularização dos VE e VEH, dentre eles os principais são o custo e a autonomia, ambos relacionados principalmente à tecnologia dos armazenadores de energia. Porém, há diversos outros fatores favoráveis à popularização dos VE e VEH, dentre os quais podem ser citados, a eficiência energética que no sistema de propulsão elétrico fica em torno de 90% contra os aproximados 40% dos veículos convencionais, também as questões ambientais, considerando que a emissão de poluentes por parte dos VEH é consideravelmente inferior comparado ao veículo convencional, chegando ser quase nula nos VE's puro.

Portanto, as pesquisas referentes à melhoria de eficiência são extremamente importantes, pois atenderá tanto ao acréscimo de autonomia quanto à redução de emissões de GEE. Estes resultados são válidos mesmo que surjam novas tecnologias de armazenadores mais eficientes e baratos.

O auxílio de *softwares* para comparar a eficiência e emissão de poluentes ajuda reduzir custos de projetos, pois permite que sejam definidos alguns parâmetros e componentes dos veículos. O *software* ADVISOR da plataforma MATLAB, é um dos *softwares* utilizados com este objetivo. Contudo, o ADVISOR não contempla o VEH com arquitetura paralela de eixos separados em sua *tool box*, sendo que esta arquitetura encontra-se bastante difundida por proporcionar grande controle de tração e estabilidade.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo produzir uma *tool box* para o *software* ADVISOR com a arquitetura de um VEH paralelo de eixos separados.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o diagrama de blocos para a arquitetura de um VEH paralelo do *software* MatLab/Simulink por meio do sistema ADVISOR;
- Realizar a modificação no diagrama de blocos da arquitetura de um VEH paralelo de maneira a se obter a separação dos sistemas de tração, construindo dessa forma um *tool box* de um VEH paralelo de eixos separados;
- Fazer ajustes necessários nos diagramas de blocos de maneira a atender o objetivo de obter a separação da propulsão do MCI e ME entre os eixos de tração.
- Proceder a validação do sistema por meio dos gráficos de torque e potências obtidos das variáveis de saída dos blocos e comparar estes com os gráficos obtidos das variáveis de saída dos blocos da configuração *PARALLEL_defaults_in* disponível na biblioteca do referido *software*.

1.4 JUSTIFICATIVA

A eficiência energética, bem como a redução de emissão de poluentes faz parte de diversos programas governamentais como por exemplo o Programa brasileiro ROTA 2030. Outro fator importante a se destacar são as limitações de emissão de poluentes impostas pelos governos por meio da legislação. No Brasil estas limitações ficaram mais rigorosas após 1999. Já em alguns países desenvolvidos esses limites começaram a ser estabelecidos no início da década de 1970. Para veículos equipados com MCI, a partir do ano de 2023, conforme resolução CONAMA nº490 de 16 de Novembro de 2018, será obrigatório o cumprimento da legislação Proconve P8. Com isso a tolerância para as emissões geradas pelos motores se torna ainda menor, trazendo para o cenário

de pesquisa e desenvolvimento a necessidade de investimento para obtenção de um trem de força mais eficiente, com isso os sistemas híbrido e elétrico podem auxiliar a alcançar o objetivo.

Deve-se destacar ainda que, para alcançar o bem comum de melhores condições ambientais deve-se investir em benefícios para incentivar a pesquisa e produção de veículos mais eficientes e menos poluentes. Podem ser citadas algumas ações governamentais de incentivo, tais como: bônus aos compradores, desconto de tributos, adoção de restrição ao uso de veículos convencionais, auxílio à pesquisa e implantação de infraestrutura.

Nesta premissa os *softwares* de auxílio aos cálculos e simulações de eficiência e emissões de poluentes são ferramentas poderosas para ajudar a reduzir custos com protótipos. Desta forma o presente trabalho é justificável, pois o *software* citado é largamente utilizado e o mesmo encontra-se desfalcado de uma configuração amplamente estudada.

1.5 ESCOPO DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está dividido em cinco capítulos, conforme descrito a seguir. No primeiro capítulo fez-se a introdução ao tema do trabalho, onde foram apresentadas algumas políticas de incentivo aos VE e VEH. Foram apresentadas também as motivações, os objetivos e a justificativa para a realização desse trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura, apresentando um pouco da história dos VE e VEH, assim como as possíveis configurações destes, os armazenadores de energia, máquinas elétricas, acionamento de motores elétricos e por fim a dinâmica veicular, com o intuito de esclarecer as características e informações utilizadas nos modelos de simulação do veículo.

No capítulo 3 é apresentada a concepção do sistema híbrido proposto no trabalho. Sendo detalhadas as características dos componentes, e ainda a arquitetura híbrida definida e os modos operacionais do veículo hibridizado. Também são apresentadas as modificações realizadas na estrutura do ADVISOR para inclusão da arquitetura paralela de eixos separados

No capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações, realizando-se uma análise dos efeitos da hibridização paralela de eixos separados

na redução do consumo e da emissão de poluentes.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e prospecções para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Apontado como uma ótima alternativa ao veículo convencional equipado com MCI, relativo às questões ambientais, e ao consumo de energia não renovável, entre outras questões, o VE ainda perde a disputa pelo mercado devido a fatores como autonomia e custos, porém existem diversas frentes em pesquisa e desenvolvimento para buscar reverter essas questões.

Diante destes fatores serão descritos os principais componentes de um VE e definidas as diferenças para o veículo elétrico híbrido (VEH), porém é importante apresentar um breve histórico referente ao VE.

2.1 HISTÓRIA DO VEÍCULO ELÉTRICO

A criação e o desenvolvimento do VE estão intimamente ligados à criação e descoberta da bateria e do motor elétrico. Em 1800, o físico italiano Alessandro Volta demonstrou como armazenar energia elétrica por meio de processos químicos, apresentando o modelo que ficou conhecido como bateria de Volta (Figura 2). Em 1821, o físico e químico inglês Michael Faraday demonstrou o princípio de funcionamento do motor elétrico utilizando em seus experimentos como fonte de energia a bateria apresentada por Alessandro Volta. Em 1831 Faraday demonstrou os princípios da indução eletromagnética e a relação entre corrente elétrica e magnetismo (HOYER, 2008; LOPES et al., 2012; CORREA et al., 2013; BARASSA et al., 2015).

Existe uma discordância com relação à data e ao inventor do primeiro veículo elétrico, alguns autores defendem que o primeiro VE foi desenvolvido pelo inventor húngaro Ányos Jedlik em 1828 (COWAN; HULTÉN, 1996; CHAN, 2013; BARASSA et al., 2015). Outro exemplo é a invenção do Professor Strating em Groningen na Holanda um pequeno modelo de carro elétrico construído em 1835 (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013).

Contudo até 1859 pouco se progrediu em relação aos VE's, quando, então, o Belga Gaston Planté demonstrou a primeira célula da conhecida "bateria de chumbo-ácido" amplamente utilizada em veículos com MCI e em veículos elétricos como fonte de energia. Outros autores citam que o primeiro veículo elétrico foi concebido em 1881 pelo engenheiro francês Gustave Trouvé (EHSANI; GAO; EMADI, 2009; HOYER, 2008;

Figura 2 – Bateria de Volta.



Fonte: Google (2017).

SOUZA et al., 2017).

De acordo com Lopes (2008) e Correa et al. (2013), entre 1873 e 1881 surgiram os primeiros veículos elétricos com condições de rodar nas estradas. Em 1882, William Ayrton e John Perry criaram um veículo propulsionado por motor elétrico de 0,5 cavalo de potência e com tensão de 20 V, o qual utilizava como fonte de energia dez células de ácido e chumbo em uma bateria com capacidade de 1,5 kWh. Esse veículo poderia percorrer uma distância entre 16 e 40 km, dependendo das condições do terreno, e a máxima velocidade alcançada foi de 14 km/h. A demonstração citada ocorreu três anos antes do engenheiro alemão Carl Benz demonstrar o primeiro triciclo tracionado por um MCI. Nesta época estava em vigor na Grã-Bretanha a lei “*Red Flag Act*”, a qual proibia a ação da propulsão à vapor nas estradas a fim de não perturbar os cavalos que estivessem transitando por estas, nesse contexto devido à velocidade, o veículo de Ayrton e Perry sofreu resistência. Até sua reformulação em 1896 esta lei introduziu severas restrições sobre todos os veículos tracionados mecanicamente em ruas Britânicas, neste período o Reino Unido viu-se atrasado em relação a outros países quanto ao desenvolvimento de veículos elétricos.

Nos Estados Unidos, o avanço das descobertas relativas aos veículos com propulsão elétrica ganhou destaque entre 1888 e 1895 com os pesquisadores Philip W. Pratt em Boston e Andrew L. Riker, dentre outros inventores. Nesta época alguns termos no campo automotivo começaram a ser utilizados com maior frequência, dentre

esses termos destaca-se o termo “*horseless carriage*” (carruagem sem cavalos), o qual foi utilizado pela primeira vez nos Estados Unidos na publicação *The Horseless Age*, e no *PallMall Gazette* de Londres foi utilizado o termo *automobile* (automóvel), ambos em 1895 (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013).

O início do século XX pode ser considerado o período de maior desenvolvimento do VE, embora os veículos com MCI tenham sido desenvolvidos rapidamente neste período. Em Londres, no ano de 1903 havia mais do que veículos à gasolina, no entanto este cenário logo mudou (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013; BARASSA et al., 2015). Para Hoyer (2008), Chan (2007) e Barassa et al. (2015) os vinte anos compreendidos entre a década de 1880 e 1900 caracterizaram-se como a “Era de Ouro” do desenvolvimento das tecnologias relacionadas ao VE. Destaca-se no referido período o desenvolvimento da infraestrutura de recarga dos automóveis elétricos, caracterizados pelos eletro-postos urbanos conectados à rede elétrica nos Estados Unidos.

O Modelo K da Ford, em 1906, apresentou o primeiro desafio real ao VE. Em 1909, quando foi lançado o Modelo T, também da Ford, ficou nítido que a propulsão elétrica havia perdido a concorrência para o MCI, com relação ao mercado de transporte particular. Em 1912, nos Estados Unidos, a produção de veículos à gasolina chegou a 900.000 unidades enquanto a produção de VE’s chegou a 30.000 (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013; SNOW, 2017).

Em 1898, Ferdinand Porsche (1875-1951) apresentou seu primeiro veículo, mostrado na Figura 3, o *C.2 Phaeto* que também ficou conhecido como P1. O primeiro protótipo do P1 foi o primeiro veículo com tração dianteira do mundo. Sua motorização era composta de um pequeno motor elétrico de 3 hp acoplado transversalmente entre as rodas dianteiras, e as rodas traseiras eram as direcionais. Este VE ainda estava longe de estar pronto para produção em série, porém foi apresentado ao público. O conceito do veículo foi descartado e outros veículos de teste foram construídos (FREITAS, 2015).

Ainda segundo Freitas (2015), para Ferdinand Porsche, o P1 foi apenas a primeira criação na sua carreira como designer de veículos. Em novembro de 1899, ele se tornou o designer-chefe do empresário Jacob Lohner, onde ele apresentou a sua próxima grande ideia: o primeiro sistema de motorização elétrica independente acoplada diretamente nas rodas do veículo (Figura 4).

Em 1900, na Exposição Universal de Paris um VE impulsionado por motores nas rodas conhecido como o “*Lohner-Porsche*” fez muito sucesso. Nesta exposição,

Figura 3 – Primeiro veículo de Ferdinand Porsche, conhecido como P1.



Fonte: Freitas (2015).

Figura 4 – Sistema de motorização elétrica diretamente nas rodas do veículo.



Fonte: Freitas (2015).

Ferdinand Porsche apresentou um automóvel esportivo equipado com quatro motores elétricos acoplados diretamente nas rodas, que foi apresentado como o primeiro veículo de passageiros 4x4 do mundo (Figura 5) (FREITAS, 2015).

No final do século XIX e início do século XX surgiram ideias para melhorar a autonomia e o desempenho dos VE's utilizando configuração híbrida. No período entre 1900 e 1912, podem ser citados como exemplo, os modelos *French Electroautomobile* de 1900 e o carro elétrico-gasolina Krieger de 1903 apresentado na Figura 6, onde ambos possuíam um ME e um MCI, e ambos forneciam tração combinada às rodas dianteiras (HOYER, 2008; LOPES, 2008; CORREA et al., 2013; SANTOS, M. M. D., 2020). A primeira conjugação dos ME's e MCI em um mesmo veículo ocorreu apenas em 1889, este feito foi realizado pelo engenheiro mecânico alemão Ferdinand Porsche, que construiu o primeiro VEH do mundo, o *Lohner-Wagen*, o qual ficou conhecido como

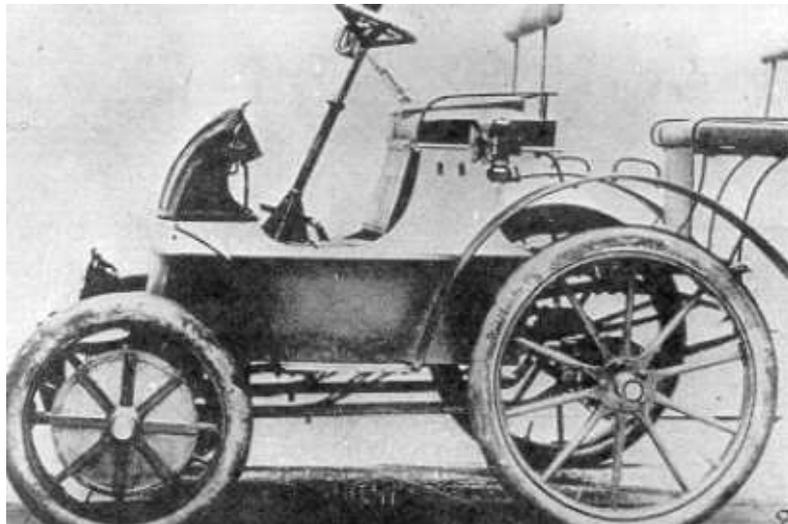
Figura 5 – Primeiro veículo de passageiros 4x4 do mundo.



Fonte: Freitas (2015).

Lohner-Porsche Mixte (Figura 7). Nesse veículo um motor à gasolina acionava um gerador responsável pela recarga das baterias que por sua vez ofereciam a potência necessária para os ME's localizados nas rodas dianteiras (HOYER, 2008; BARASSA et al., 2015).

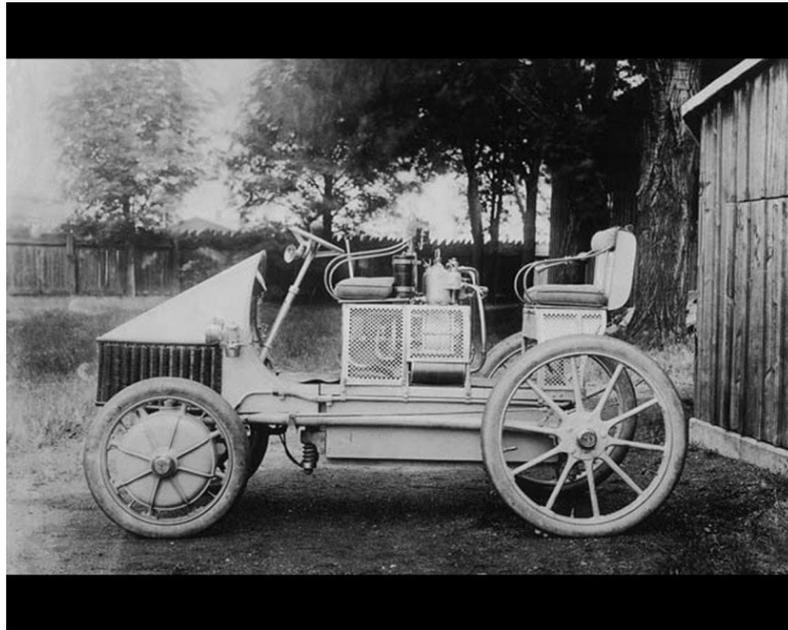
Figura 6 – Carro elétrico-gasolina Krieger.



Fonte: Lopes (2008).

Em 1901 foi apresentado em Paris um modelo projetado por Camille Jenatzy, o qual possuía um motor elétrico em cada uma das rodas dianteiras com um conjunto de enrolamentos paralelos destinados à frenagem regenerativa, cujos motores operavam independentemente ou em conjunto, e também um dínamo acoplado ao eixo do motor à combustão era empregado no carregamento das baterias durante descidas (FERREIRA, T. J. P. et al., 2014; SANTOS, M. M. D., 2020).

Figura 7 – Lohner-Porsche Mixte.



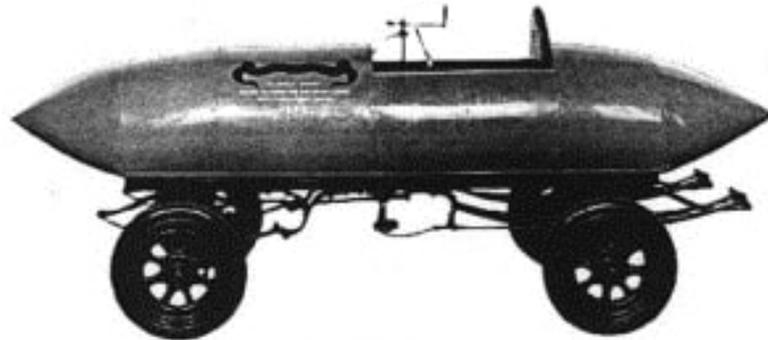
Fonte: Google (2017).

Outra tecnologia que contribuiu para o melhoramento dos VE's foi a frenagem regenerativa, que consiste em transformar a energia cinética dissipada no processo de frenagem do automóvel em energia elétrica para recarregar as baterias (CHAN, 2007; BARASSA et al., 2015).

Com o pico de produção de VE's por volta de 1912, a combinação híbrida entre os sistemas de propulsão elétrica e mecânica no modelo de veículo '*Woods Gasoline-Electric*' datado de 1916, atingiu um bom nível de desenvolvimento, o que permitiu a produção e comercialização desses veículos. Neste veículo, um pequeno motor à gasolina de quatro cilindros foi acoplado a um ME responsável pela força de tração no eixo traseiro. Neste arranjo, sempre que o ME ou o MCI fossem operados, ambos deveriam propulsionar o veículo. Isto significa que o carro poderia operar como um veículo puramente à gasolina ou como um puramente elétrico. Este veículo ainda poderia operar no modo híbrido-elétrico no qual o ME auxiliaria o MCI em picos de potência ou no modo gerador carregando o conjunto de baterias. O arranjo descrito é conhecido nos dias de hoje como VEH paralelo. A grande desvantagem do modelo de VEH, '*Woods Gasoline-Electric*', foi seu custo relativamente maior que o de um puramente elétrico e o de um à gasolina, resultando na venda de poucas unidades desses veículos híbridos (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013; SANTOS, M. M. D., 2020).

O VE era então considerado tecnologicamente superior aos demais. Em 1899, um VE, o “*Le Jamais Contente*” Figura 8, do inventor belga Camille Jenatzy, foi o primeiro automóvel a quebrar a barreira dos 100 km/h. Já a indústria do VE possuía uma rede industrial e tecnológica bem desenvolvida e com fácil acesso a fornecedores, pois utilizava componentes parecidos com os dos bondes elétricos, que eram o principal meio de transporte público das grandes cidades (BARAN, 2012; SANTOS, M. M. D., 2020).

Figura 8 – “*Le Jamais Contente*”.



Fonte: Tarcísio José Pedrobon Ferreira et al. (2014).

Após 1912 iniciou o declínio do uso e da produção dos veículos elétricos enquanto observava-se o notável crescimento da produção de veículos à gasolina. O último modelo de VE, antes do renascimento, foi produzido nos EUA em 1921 (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013; BARASSA et al., 2015). A partir de então, a tecnologia de tração elétrica foi pouco explorada, dentre as iniciativas pontuais, destacam-se os estímulos vindos das duas Guerras Mundiais que ocorreram no século XX: a Primeira Guerra Mundial (1914 - 1918) e a Segunda Guerra Mundial (1939 - 1945). Nos períodos de guerra, houve um direcionamento de recursos para o esforço de batalha que afetou diretamente a indústria automobilística, direcionando a maior parte dos veículos movidos com MCI para o conflito. Para suprir as demandas externas à guerra recorreu-se aos VE's, esses utilizados para o transporte e serviços públicos (BARASSA et al., 2015).

Voltando a ser desenvolvido a partir dos anos 60 quando VE passou a ser considerado uma saída para a superação de problemas ambientais causados por emissões dos MCI's. Nos anos 60 a maior parte dos VE's produzidos foi resultado da conversão de veículos convencionais. Nesse período, os maiores esforços em avanços tecnológicos de tração elétrica concentraram-se na Inglaterra e EUA (LOPES, 2008; CORREA et al., 2013).

Por mais que o maior desenvolvimento tecnológico do MCI tenha ocorrido principalmente no âmbito dos automóveis de passeio, haja vista sua representatividade expressa nas elevadas vendas acumuladas ao longo do século XX, é necessário fazer uma ressalva em relação aos veículos elétricos do segmento pesado como os ônibus, bem como os veículos elétricos ferroviários. Destaca-se que, os veículos exclusivamente voltados ao transporte coletivo continuaram com sua comercialização neste período em que o automóvel elétrico praticamente desapareceu (BARASSA et al., 2015).

Outro fator que contribuiu para a queda nas vendas dos veículos com propulsão elétrica e aumento nas vendas dos veículos com motor a combustão deve-se a descoberta das jazidas de petróleo no Texas no período assinalado e o poder das companhias petrolíferas americanas, principalmente da *Standard Oil Company*. As petrolíferas norte-americanas tinham o poder de ajuste do preço do petróleo, o que refletia diretamente no preço final da gasolina para o consumidor. As petrolíferas optaram pela diminuição gradual do preço do petróleo, ficando abaixo do custo equivalente da eletricidade para um VE (COWAN; HULTÉN, 1996; ANDERSON, C. D.; ANDERSON, J., 2010; BARASSA et al., 2015).

Outro dado que é importante destacar refere-se à supressão, por parte das empresas ligadas ao petróleo e aos motores a combustão interna, das empresas que trabalhavam e desenvolviam tecnologias dos automóveis elétricos. Esta supressão deu-se pelas aquisições corporativas e compra de patentes de tecnologias dos VE's pelas empresas ligadas à tecnologia do MCI. As empresas adquiridas mudavam seu escopo de atuação e as patentes eram arquivadas (BARASSA et al., 2015).

Também é importante destacar o sistema lançado pelo empreendedor estadunidense Henry Ford (1863 – 1947), o qual propunha um sistema de produção em série, utilizado na produção dos veículos equipados com MCI. O sistema citado possibilitou que o valor final dos veículos movidos à gasolina ficasse entre US\$ 500 e US\$ 1000, sendo estes valores a metade do valor pago por um VE (BARASSA et al., 2015).

Outrossim, o motor a combustão interna contou com o amplo apoio financeiro da indústria petrolífera norte-americana, a qual havia se consolidado no país e desfrutava de amplo poder, seja na esfera política quanto econômica. Os veículos com propulsão elétrica, por sua vez, não conseguiram solucionar os problemas relativos à autonomia e à diminuição dos custos produtivos no período (COWAN; HULTÉN, 1996; BARASSA et al., 2015).

Após o ano de 1973 é caracterizada a retomada das pesquisas e produção de VE rodoviário no cenário mundial, após ter praticamente desaparecido por aproximadamente 50 anos. O marco refere-se à crise do petróleo, que consistiu no aumento excessivo, a nível global, do preço desta fonte energética, deixando clara a fragilidade de economias muito dependentes da importação deste tipo de matéria prima (BARASSA et al., 2015).

Com isso, identificam-se três fatores principais que auxiliaram a retomada das pesquisas com relação ao VE a nível mundial. O primeiro deles refere-se à crise do petróleo em 1973 e os graduais aumentos do preço dos combustíveis fósseis, que como consequência encareceu o custo de rodagem de um automóvel dotado de MCI. O segundo fator está relacionado com os debates e acordos políticos pautados pela agenda ambiental na década de 1970. Por fim, o terceiro fator envolve a questão da saúde pública relativo aos problemas de saúde causados pela emissão de poluentes pelos veículos equipados com motor a combustão interna (BARASSA et al., 2015).

A partir da década de 1970, alguns países desenvolvidos dentre os quais Estados Unidos, Japão e alguns países pertencentes ao continente europeu, passaram a formular e desenvolver um conjunto de ações e iniciativas em prol da retomada da produção e comercialização dos veículos elétricos, principalmente os automóveis (COWAN; HULTÉN, 1996; BARASSA et al., 2015; HOYER, 2008).

Contudo, mesmo com todas as iniciativas públicas para incentivar a P&D dos VE's, nenhuma delas resultou em produção em série destes veículos no século XX; pois, o VE ainda não era competitivo o suficiente com relação ao MCI. No entanto, esse panorama apresenta indícios de mudança no início do século XXI (BARASSA et al., 2015).

Em consequência dos esforços dos pesquisadores, as tecnologias relacionadas aos VE's, obtiveram grande avanço nas duas últimas décadas do século XX (CHAN, 2007; HOYER, 2008). O grande desenvolvimento dessas tecnologias foi possível devido ser utilizado tecnologia do setor elétrico no setor automotivo. A indústria elétrica desenvolveu e utilizou abundantemente o motor elétrico, baterias, e demais componentes durante a metade do século XX, período em que quase não houve pesquisa relativa aos principais componentes que equipam o VE. Com as adaptações das tecnologias do setor elétrico no VE, foi possível um desenvolvimento rápido de alguns modelos, que logo no início do século XXI entraram em comercialização (CHAN, 2007; MORAES;

BARASSA; CONSONI, 2016).

Apesar da retomada das pesquisas relativas ao VE na década de 1970, as ações desempenhadas em benefício do segmento foram pontuais e desempenhadas por um grupo restrito de países, com destaque para os Estados Unidos, Japão e França. Vale destacar ainda que na virada do século XX para o XXI, a participação de mercado dos VE's era de aproximadamente 1% frente às vendas globais de veículos (BARASSA et al., 2015).

Em 1997, a Toyota, fabricante japonesa de automóveis que não estava incluída no PNGV (*Partnership for a New Generation Vehicles*), programa lançado durante o governo Clinton, em 1993 nos Estados Unidos, lançou no mercado japonês o Prius, que no início obteve boa aceitação no mercado. Naquele mesmo ano, a Audi lançou o Duo, o primeiro híbrido do mercado europeu, porém não obteve boa aceitação no mercado. Diversas montadoras europeias se dedicavam, naquela época, ao desenvolvimento de automóveis a diesel, visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Desta forma, os elétricos não despertavam tanto interesse (BARAN, 2012; SANTOS, M. M. D., 2020).

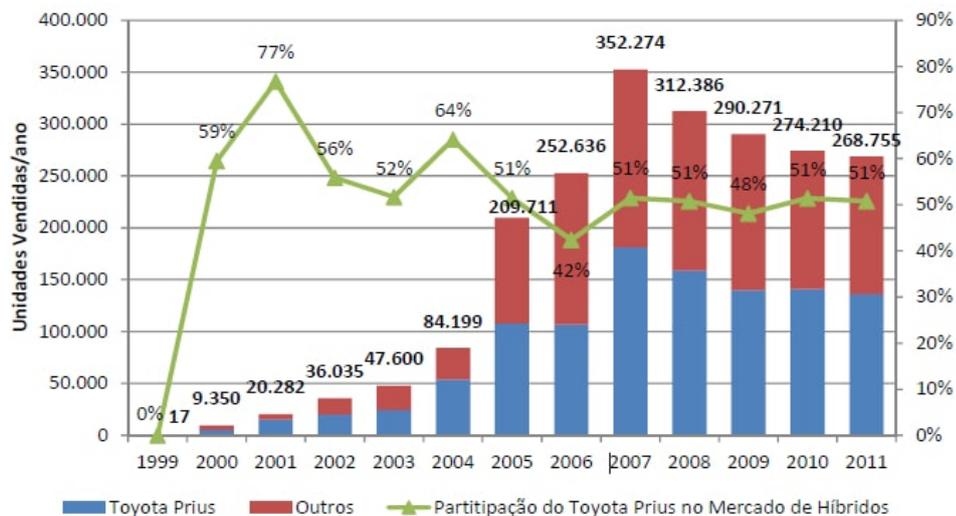
A Honda, em 1999, lançou um híbrido no mercado americano, o Insight, que foi um sucesso imediato de vendas. Em 2000, o Prius foi lançado no mercado americano, obtendo um sucesso muito maior que o esperado pela Toyota, se repetindo o sucesso no mercado europeu. Em 2003, a Honda lançou o Civic híbrido, com a mesma aparência e dirigibilidade do Civic convencional. Em 2004 a Ford lançou o Escape, um veículo utilitário esportivo, em versão híbrida (BARAN, 2012; SANTOS, M. M. D., 2020).

Em julho de 2009, foi promulgado nos EUA o *American Clean Energy and Security Act 2009*. Esta lei fundamentou que a Secretaria de Energia, as agências reguladoras estaduais e todas as distribuidoras de energia não reguladas deveriam apresentar planos para o desenvolvimento de Redes Inteligentes (*smart grids*) integradas, com assistência à tecnologia VEH *Plug-In* até julho de 2012, com auxílio financeiro às montadoras que se dedicassem ao desenvolvimento de híbridos e seus fornecedores de autopeças. Os principais objetivos do governo Obama foram (BARAN, 2012):

- Criar empregos “verdes”;
- Reduzir a dependência do petróleo;
- Amenizar as emissões de gases de efeito estufa e;
- Buscar a transição para uma economia baseada em energia limpa.

Indiretamente, o incentivo financeiro à inovação tecnológica teria como objetivo ajudar a salvar a indústria automobilística americana durante a crise mais grave de sua história (BARAN, 2012). Em consequência às políticas de incentivo, aumentou a participação dos VEH no mercado norte-americano. Pode-se observar na Figura 9, que em 2011 foram vendidas 268.755 unidades de híbridos nos E.U.A.. Nos Estados Unidos foram comercializados 38 modelos de híbridos desde o lançamento do Honda Insight, em 1999, sendo vendidas desde então 2.157.726 unidades. Sendo que o modelo mais popular é o Toyota Prius, dos quais foram vendidas 1.091.564 unidades desde seu lançamento, seguido pelo Honda Civic e o Toyota Camry, que venderam respectivamente 209.216 e 178.805 unidades desde que foram lançados. Praticamente todos os fabricantes ofertam pelo menos um modelo de híbrido. A Figura 9 apresenta a evolução das vendas de híbridos no mercado norte-americano desde seu lançamento (BARAN, 2012).

Figura 9 – Evolução de Vendas de Veículos Híbridos.



Fonte: Baran (2012).

Após o Prius, os lançamentos mais marcantes do mercado norte-americano foram o GM Volt e o Nissan Leaf. O lançamento do Volt foi anunciado pela General Motors em 2007. O Volt percorre, com carga plena, 40 milhas (ou 64 km) na configuração elétrico puro. Quando descarregado, entra em ação um motor a gasolina que gera eletricidade para alimentar o motor elétrico, tal qual um híbrido em série convencional (BARAN, 2012).

O lançamento do Leaf foi anunciado pela Nissan em 2009. Trata-se de um carro elétrico a bateria que pode percorrer, de acordo com o fabricante, 100 milhas (ou 160

km) a cada recarga. A Nissan adotou uma política de preços agressiva, com preços bastante competitivos com os MCI.

No contexto atual, pode-se afirmar que os VEH's podem ser considerados o passo intermediário da evolução entre os automóveis convencionais e os elétricos. Mesmo o fato das tecnologias híbrida e elétrica não serem recentes, para a geração atual de consumidores representam uma novidade, e devem, portanto, ser tratadas como um novo produto a ser inserido no mercado (BARAN, 2012).

2.2 DEFINIÇÕES DO VEÍCULO ELÉTRICO

Definir alguns conceitos relacionados aos veículos elétricos e híbridos torna-se importante para que haja uma compreensão melhor do desenvolvimento desse trabalho. Dessa forma a seguir são apresentadas as principais definições inseridas nesta abordagem.

De maneira simplificada, é possível classificar os veículos elétricos em duas categorias: híbridos e puros.

2.2.1 Veículos Elétricos Puros

Os veículos puramente elétricos possuem como elemento responsável pela tração um ou mais motores elétricos, não havendo MCI. A energia utilizada para movimentar o veículo provém de baterias, ou placas fotovoltaicas (energia solar), ou ligados à rede elétrica como os trólebus - ônibus elétrico alimentado por uma catenária de dois cabos superiores a partir da qual recebe a energia elétrica mediante duas hastes, ou células combustíveis, que são células eletroquímicas que convertem combustível em eletricidade, entre outros. As grandes montadoras têm optado pelos modelos a bateria (CASTRO; FERREIRA, T. T., 2010; SILVA, R. A., 2017).

Em geral, os VE's puros utilizam no sistema de propulsão motores elétricos e baterias eletroquímicas (via de regra) como fontes de energia. Algumas vantagens dos veículos equipados com propulsão elétrica em relação aos equipados com MCI são (TANAKA, 2013):

- Possui eficiência energética maior;
- Produz menos poluentes;

- É possível utilizar em ambientes fechados;
- São mais silenciosos;
- A manutenção é simples e fácil;
- Pode desenvolver alto torque com baixa rotação;
- Em consequência da menor vibração provocam menos fadiga ao motorista;
- Quando parados não consomem energia.

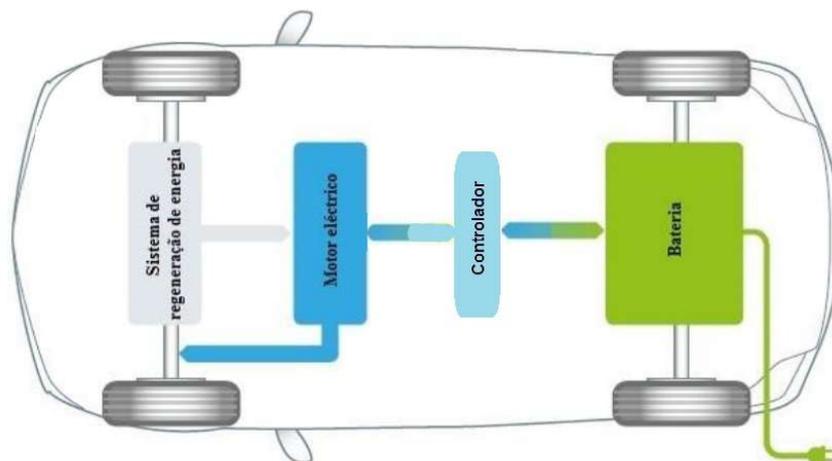
No entanto, há desvantagens, as quais são elencadas. Porém, algumas dessas desvantagens estão sendo minimizadas por meio da P&D (TANAKA, 2013):

- A autonomia é menor;
- O custo ainda é elevado;
- Necessita substituir as baterias ao final do ciclo de vida;

Na Figura 10 é apresentado um conceito do veículo elétrico a bateria. O sistema de tração contém:

- Um conjunto armazenador de energia para estocar energia;
- Um ou mais motores elétricos;
- E um controlador/conversor de potência.

Figura 10 – Conceito de VE com baterias.



Fonte: Rodrigues (2013).

Para recarregar as baterias pode-se utilizar a energia proveniente da rede elétrica, ou outra fonte de energia elétrica. A unidade de recarga de bateria pode ser transportada a bordo do veículo, ou estar disponível no ponto de recarga. A velocidade do veículo é ajustada com o auxílio do controlador que ajusta a energia das baterias às características do motor e gerencia a potência fornecida (TANAKA, 2013; SILVA, R. A., 2017).

A frenagem regenerativa auxilia na recuperação de energia, bem como proporciona uma frenagem sem atrito entre as peças responsáveis pela frenagem mecânica, a frenagem regenerativa converte energia cinética da rotação do ME em energia elétrica (SILVA, R. A., 2017; JUNIOR; DE ABREU, 2019).

Com relação às variações de características de tração elétrica e fontes de energia, é possível uma diversidade de configurações de VE's. Na Figura 11(a) o MCI é substituído por um motor elétrico, ficando assim constituído o sistema de tração: um motor elétrico, uma embreagem, uma caixa de velocidades e um diferencial. Para ligar ou desligar a potência do ME às rodas motrizes é utilizada a embreagem. Para modificar o perfil velocidade-potência (torque) é utilizada a caixa de velocidade. O diferencial, geralmente um conjunto de engrenagens planetárias, pode ser utilizado para acionar as rodas dos dois lados com velocidades diferentes. Na Figura 11(b) utiliza-se um motor que trabalha com potência constante em uma grande faixa de velocidades. É reduzido o tamanho e peso da transmissão mecânica com essa configuração.

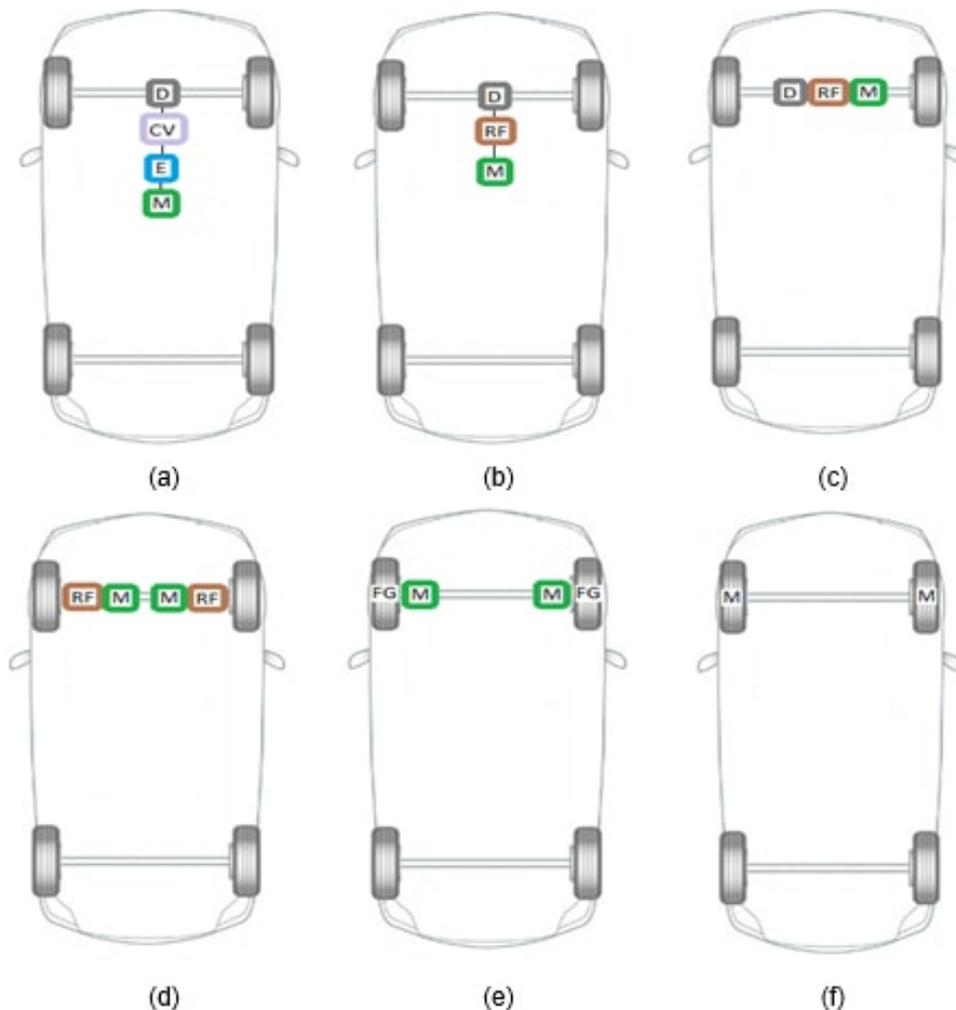
Na Figura 11(c) o ME, a caixa de redução e o diferencial podem ser incorporados em um único sistema. Já na configuração da Figura 11(d) são utilizados dois motores de tração, sendo assim substituído o diferencial mecânico. Cada motor aciona uma roda, e ambos podem atuar com velocidades diferentes. Na Figura 11(e) pode-se utilizar o motor dentro da roda, esse sistema é denominado *in-wheel*. Para aumentar o torque e reduzir a velocidade pode-se utilizar um conjunto de engrenagens planetárias. Já na Figura 11(f) pode-se eliminar integralmente o sistema de transmissão mecânica entre o ME e a roda de tração. O rotor externo de um ME *in-wheel* de baixa rotação pode ser conectado diretamente à roda de tração. Porém, é necessário que o motor possua um torque maior para partir e acelerar o veículo.

Devido à utilização de um MCI os modelos híbridos possuem maior autonomia em relação aos VE's puros, nos demais parâmetros os VEH's e os VE's são similares (CASTRO; FERREIRA, T. T., 2010).

2.2.2 Veículos Elétricos Híbridos

Os VEH's possuem essa designação por combinarem um MCI com um gerador, uma bateria e um ou mais ME's. Atualmente a principal função dos VEH's é atuar no auxílio à redução do gasto de energia associado à baixa eficiência dos processos

Figura 11 – Configurações de VE's puros.



E = Embreagem; D = Diferencial; RF = Redução Fixa; CV = Caixa de Velocidades
M = Motor.

Fonte: Adaptado de Tanaka (2013).

mecânicos quando comparados aos sistemas eletrônicos (SILVA, R. A., 2017).

Um dos principais motivos da baixa eficiência energética de um MCI deve-se à geração de calor causada pelo atrito entre as partes móveis. É estimado que para movimentar um veículo somente 15% do potencial energético é aproveitado (SILVA, R. A., 2017).

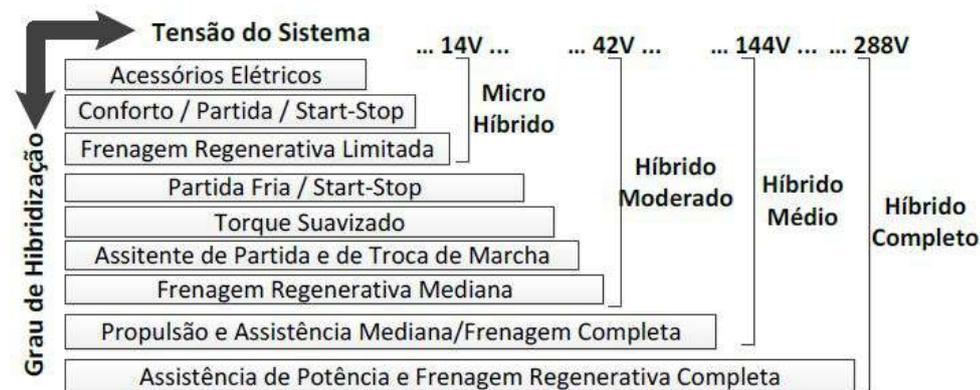
Os VEH's podem ser divididos em categorias de acordo com a arquitetura de construção, sendo elas série, paralelo, esta última dividindo-se em paralelo-SA e paralelo-ES (*split*), e série-paralelo. Também pela forma que a energia é transmitida para as rodas, e ainda pelo grau de hibridização do veículo (CORREA et al., 2013; LARMINIE; LOWRY, 2004; SILVA, R. A., 2017) como abordado a seguir.

2.2.2.1 Grau de Hibridização

As características operacionais de tração do veículo determinam a classificação do grau de hibridização; ainda a forma como o sistema de frenagem regenerativa faz a recarga da energia influenciam nesta classificação. Os graus de hibridização são denominados de Micro Híbrido, Híbrido Moderado, Híbrido Médio e Híbrido Completo. Essa classificação pode ser observada na Figura 12 (SILVA, R. A., 2017). Sistemas elétricos embarcados mais complexos com níveis de tensão mais elevados, significam que o veículo possui um grau de hibridização maior com incremento de modos de operação e funcionalidades.

Pode-se calcular o grau de hibridização, para veículos com arquitetura paralela, por meio da relação das potências dos motores de tração, conforme apresentado na Equação 1 (LARMINIE; LOWRY, 2004; SILVA, R. A., 2017).

Figura 12 – Classificação dos VEH's quanto ao grau de hibridização.



Fonte: Rafael Atila Silva (2017).

$$DOH = \frac{Pot_{ME}}{Pot_{ME} + Pot_{MCI}} \quad (1)$$

Onde:

DOH = Grau de hibridização;

Pot_{ME} = Potência do motor elétrico;

Pot_{MCI} = Potência do motor a combustão.

2.2.2.1.1 *Micro Híbrido*

Este grau de hibridização não apresenta sistema de tração elétrica de assistência à tração convencional. Utiliza uma função denominada *Start/Stop*, a qual atua para desligar o veículo quando este estiver parado no trânsito, auxiliando na redução de consumo de combustível e na emissão de poluentes. No entanto, para o funcionamento da função *Start/Stop* uma central eletrônica monitora a velocidade de transmissão engrenada, deve ser nula, e o estado de carga das baterias, deve ser suficiente para dar a partida novamente. A frenagem regenerativa é utilizada neste grau de hibridização, convertendo a energia cinética durante a frenagem em energia elétrica para as baterias (SILVA, R. A., 2017).

2.2.2.1.2 *Híbrido Moderado a Médio*

Em regimes específicos de operação, o sistema de tração recebe o auxílio de uma máquina elétrica. Pode-se extrair o máximo de potência de ambos os sistemas de propulsão neste nível de hibridização, dispondo desta maneira de uma potência conjunta de tração maior, esta função do modo de operação é conhecida como *Boost*. Com este sistema aumenta-se a economia de combustível e reduz a emissão de poluentes (SILVA, R. A., 2017).

2.2.2.1.3 *Híbrido Completo*

Neste grau de hibridização os sistemas de propulsão por MCI e elétrica são desacoplados, possibilitando um modo de operação mais flexível. Contudo, as modificações na estrutura e arquitetura dos veículos são maiores e ainda é necessário maior capacidade energética do sistema de armazenamento de energia. Este grau de hibridização apresenta maior economia de combustível e menores taxas de emissão de poluentes. Podem aparecer nas configurações série, paralelo e série-paralelo (SILVA, R. A., 2017).

2.2.2.2 Configurações dos VEH's

De acordo com a arquitetura os VEH's podem ser classificados como série, paralelo, série-paralelo e *power split* (CORREA et al., 2013; SILVA, R. A., 2017).

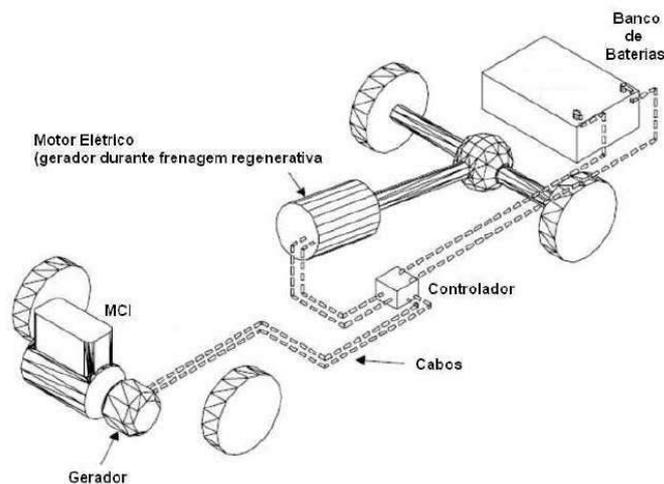
Serão apresentadas as definições destes sistema nas subseções seguintes.

2.2.2.2.1 Híbrido Série

No VEH série a força de propulsão do veículo advém apenas de um ou mais motores elétricos (ME), não havendo conexão mecânica entre o MCI e as rodas do veículo. Nesta arquitetura as perdas de energia devido resistências internas dos acoplamentos mecânicos e fricção são maiores. São necessárias duas conversões de energia entre o MCI e as rodas ($MCI \rightarrow Gerador \rightarrow Bateria \rightarrow ME$) (CORREA et al., 2013; SILVA, R. A., 2017).

A Figura 13 ilustra um VEH em configuração série.

Figura 13 – Veículo Híbrido em Configuração Série.



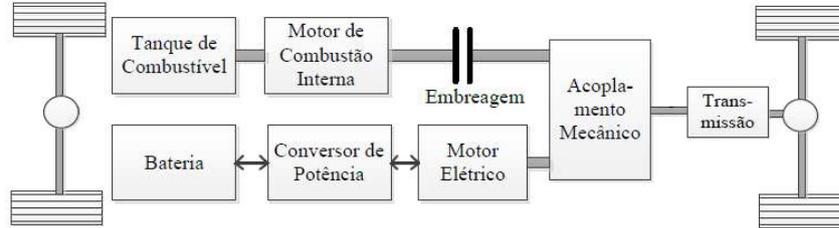
Fonte: Correa et al. (2013).

2.2.2.2.2 Híbrido Paralelo

Na arquitetura em paralelo os sistemas de propulsão elétrico e mecânico estão acoplados ao sistema de transmissão, desta forma é possível operar de forma individual ou conjunta os motores de tração. Nesta arquitetura a regeneração da carga da bateria ocorre por meio da frenagem regenerativa e nos intervalos quando o veículo não está

sendo propulsionado (CORREA et al., 2013; SILVA, R. A., 2017). Na Figura 14 é ilustrada a configuração em paralelo de um VEH.

Figura 14 – Veículo Híbrido em Configuração Paralela.

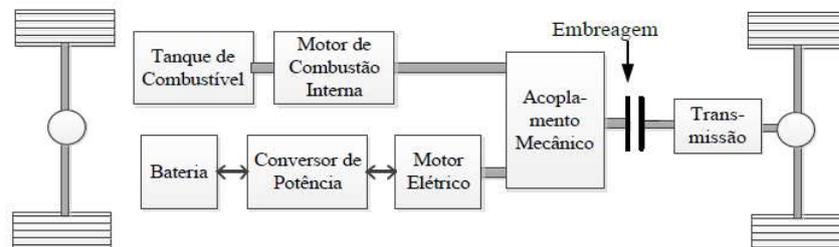


Fonte: Rafael Atila Silva (2017).

- Híbrido Paralelo-SA

A configuração Paralelo-SA é denominada assim por ser utilizada para assistência e partida. Nesta arquitetura o ME e o MCI são conectados ao sistema de transmissão por meio do acoplador de torque, sendo isolados por meio do sistema de embreagem (SILVA, R. A., 2017). A Figura 15 ilustra essa configuração Paralelo-SA.

Figura 15 – Veículo Híbrido em Configuração Paralelo-SA.



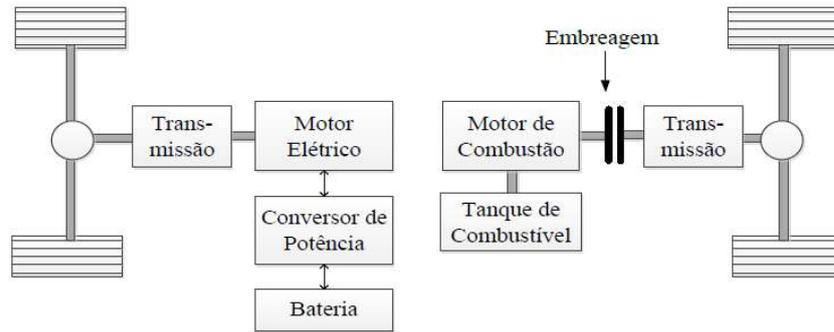
Fonte: Adaptado de Rafael Atila Silva (2017).

- Híbrido Paralelo-ES (*Split*)

A configuração Paralelo-ES é denominada por ter o sistema de tração separado nos dois eixos, sendo um eixo propulsionado pelo MCI e o outro pelo sistema elétrico. Essa configuração é conhecida na literatura também por *Through-The-Road* (TTR) (SILVA, R. A., 2017). Na Figura 16 é mostrada a configuração paralela de eixos separados.

A arquitetura Paralelo-ES necessita menos modificações, para converter um veículo convencional para VEH, comparado com as demais configurações,. Ainda, possui a vantagem de operar com propulsão em cada um dos eixos de forma independente ou combinadas para uma tração 4x4 (SILVA, R. A., 2017).

Figura 16 – Veículo Híbrido em Configuração Paralela-ES.

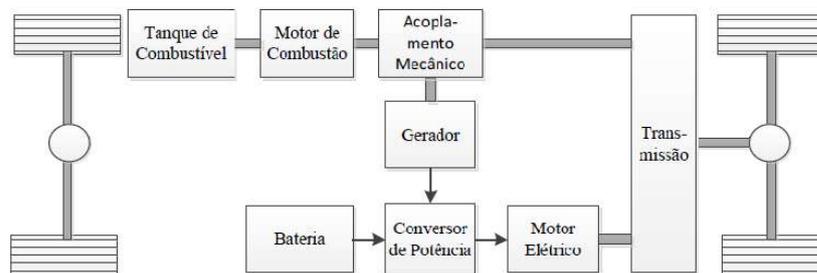


Fonte: RÁ Silva e Pires (2016).

2.2.2.2.3 Híbrido Série-Paralelo

Na configuração Série-Paralela, é adicionada à configuração paralela um gerador acoplado ao MCI, gerando energia para o sistema de armazenamento (SILVA, R. A., 2017). Na Figura 17 é ilustrado a configuração Série-Paralela.

Figura 17 – Veículo Híbrido em Configuração Série-Paralelo.



Fonte: Adaptado de Rafael Atila Silva (2017).

Esta arquitetura possui grau de liberdade mais elevado. Pode-se utilizar a frenagem regenerativa e o MCI para recarregar o sistema de armazenamento de energia (SILVA, R. A., 2017).

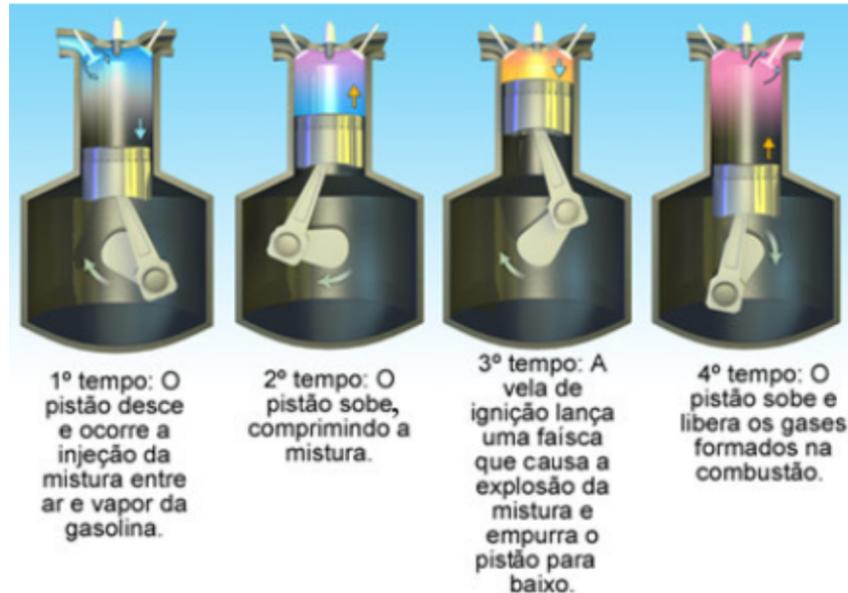
2.3 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA (MCI)

O motor a combustão interna é uma máquina térmica que transforma energia térmica em energia mecânica. Esta reação é composta de, pelo menos, um comburente, o ar, e um combustível, como gasolina, etanol, diesel ou outros. Podem ser de ignição por centelha (gasolina e etanol), e ignição por compressão (diesel). Com regime de trabalho em dois ou quatro tempos (SILVA, R. A., 2017).

Neste trabalho será apresentado o funcionamento básico do motor de quatro

tempos com ignição por centelha do ciclo Otto, por ser este o modelo mais utilizado nos veículos convencionais e VEH.

Figura 18 – Descrição dos 4 tempos do motor de ciclo Otto.



Fonte: Oliveira (2018).

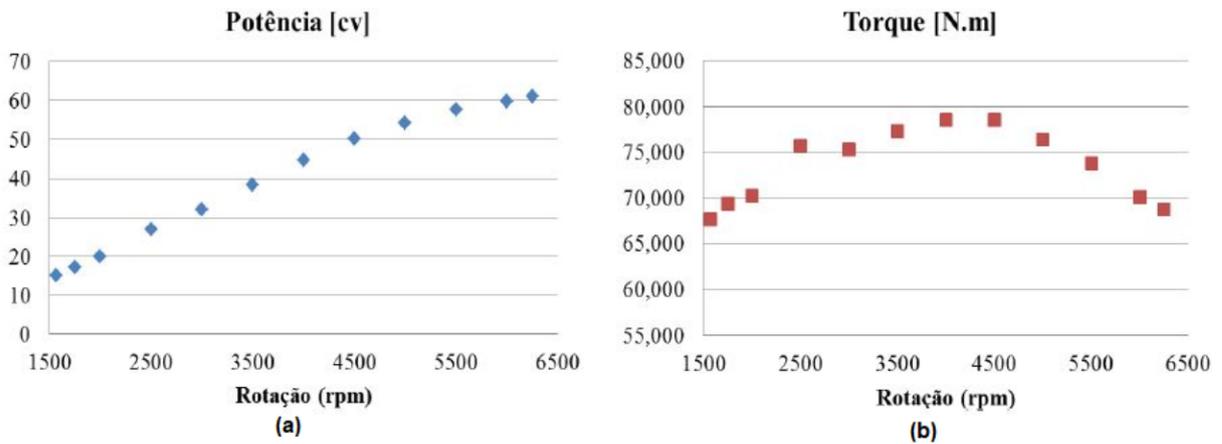
Como pode ser visto em Figura 18, o ciclo Otto compreende quatro etapas, como descrito:

- Admissão (Primeiro tempo): após a abertura da válvula acontece a admissão da mistura ar e combustível para dentro da câmara de combustão. O pistão é deslocado para a parte inferior da câmara;
- Compressão (Segundo tempo): a válvula de admissão fecha e o pistão é deslocado verticalmente para cima comprimindo a mistura. A pressão e temperatura interna aumentam devido a compressão. É gerada pela vela uma centelha interna para provocar a explosão;
- Expansão (Terceiro tempo): o pistão é impulsionado para a parte inferior da câmara em consequência da explosão provocada no interior da câmara de combustão;
- Exaustão (Quarto tempo): a válvula de escape é aberta, liberando os gases provenientes da queima do combustível.

Em Rafael Atila Silva (2017) foram apresentados os dados de bancada de um MCI de 1.0L - 999cc. Com potência de aproximadamente 61,1 cv, equivalente à 44,97 kW, à velocidade de rotação de 6250 rpm. O pico máximo de torque acontece com 4500

rpm, com aproximadamente 78,56 N.m, ou 8 Kgfm. Esses dados podem ser observados na Figura 19 (a) é o gráfico referente à potência e (b) é o gráfico referente ao torque.

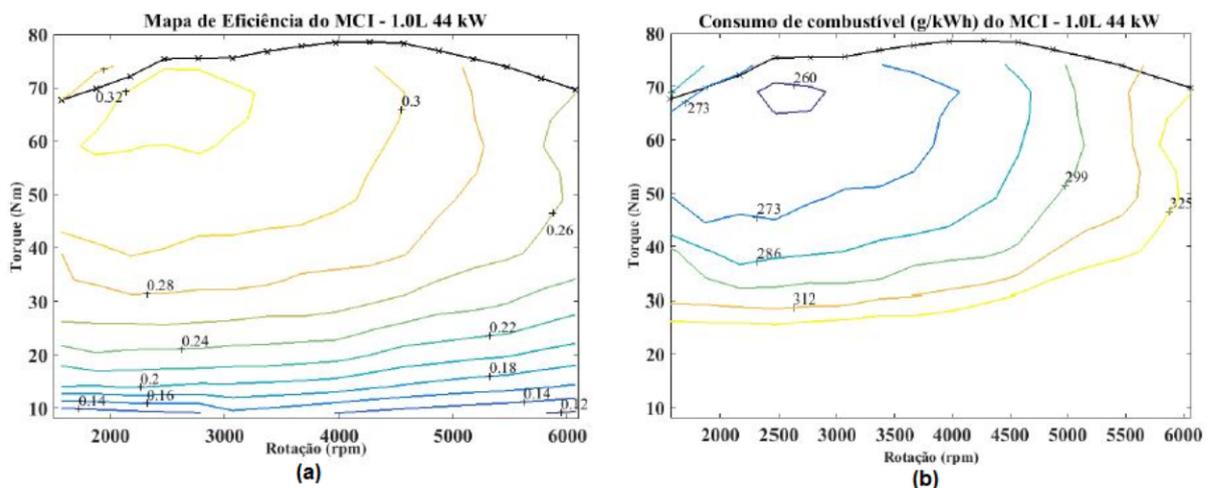
Figura 19 – Curvas de Potência e Torque do MCI 1.0L - 44kW.



Fonte: Rafael Atila Silva (2017).

Na Figura 20 podem ser observados os mapas de eficiência (a) e consumo de combustível (b) do MCI de 1.0L - 44kW apresentado em (SILVA, R. A., 2017). Onde, os mapas representam as regiões de operação do MCI limitados ao máximo torque, no mapa do lado esquerdo da Figura 20 são apresentadas as curvas de nível que delimitam as regiões de eficiência, na qual a máxima eficiência está limitada em 32% entre 2000 e 3000 rpm com torque de 58 e 70 N.m. Já o mapa do lado direito da Figura 20 estão representadas as curvas de nível do consumo em gramas por kWh, a região de menor consumo coincide com a região de melhor eficiência.

Figura 20 – Mapas de Eficiência e de Consumo de combustível do MCI 1.0L - 44kW.



Fonte: Rafael Atila Silva (2017).

2.4 TRANSMISSÃO

Em Rafael Atila Silva (2017) o autor apresenta os dados referentes à uma transmissão manual de cinco velocidades, de um veículo compacto nacional. O conjunto composto pela caixa de marcha e diferencial possui massa aproximada de 65 kg e eficiência de 94%.

Ainda em Rafael Atila Silva (2017) são apresentados os valores das reduções sendo: para a primeira marcha 4,273, para a segunda marcha 2,238, terceira marcha 1,444, quarta marcha 1,029, quinta marcha 0,838 e diferencial 4,067.

2.5 ARMAZENADORES DE ENERGIA

Nos VE's os armazenadores de energia elétrica são essenciais para o funcionamento do sistema de propulsão elétrico. Dentre os componentes constituintes do sistema responsável pela propulsão em um VE os armazenadores são os responsáveis pelo maior custo, peso e volume (LARMINIE; LOWRY, 2004; BENTO, 2015). Os armazenadores de energia elétrica devem ser dimensionados de maneira a atender os requisitos de fornecimento de potência necessária para o funcionamento do ME, bem como possuir capacidade de armazenamento suficiente para atender o ciclo proposto (BURKE; ZHAO, 2012; TANAKA, 2013; BENTO, 2015). As tecnologias de armazenamento de energia podem ser classificadas conforme apresentado a seguir (RODRIGUES, 2013):

- Armazenamento de energia elétrica: bobinas supercondutoras e supercapacitores.
- Armazenamento de energia eletroquímica: células combustíveis e baterias.
- Armazenamento de energia mecânica: volantes de inércia, aproveitamentos hidroelétricos reversíveis (bombagem de água) e sistemas de ar comprimido.
- Armazenamento de energia térmica: calor em materiais cerâmicos e sais fundidos.

Neste trabalho com relação aos armazenadores serão descritos somente as baterias.

2.5.1 Baterias

As baterias são dispositivos de armazenamento de energia que consistem em uma ou mais células eletroquímicas que convertem a energia química armazenada em energia elétrica. Por célula entende-se dois eletrodos, um positivo e um negativo, unidos por meio de um eletrólito que é o meio responsável pela condução dos íons entre dois eletrodos e o separador que divide fisicamente as parcelas com diferentes polaridades. Durante as operações de carga e descarga, ocorrem em seu interior reações de oxidação, ou redução das partes ativas, resultando assim na adição ou remoção de íons. Em baterias recarregáveis, a reação química pode ser revertida por meio da inversão da corrente elétrica fazendo com que a bateria retorne a um determinado estado de carga (SOC) (REVOREDO, 2007; CORREA et al., 2013).

Nos VE's existe a necessidade de se utilizar bateria tracionaria, que pode ser primária ou secundária. As baterias tracionarias diferem das baterias utilizadas para partida, iluminação entre outras comodidades, pois elas são projetadas para fornecer energia por períodos prolongados, sendo projetadas para altos valores de corrente e para descarga profunda (MACHADO, 2015).

No veículo elétrico puro a bateria é o componente principal. Portanto, deve ser dimensionada de maneira a atender algumas características, seguem as mais importantes (MACHADO, 2015):

- **Segurança:** esse aspecto é de relevante importância, sendo a fuga térmica uma preocupação expressiva. As baterias possuem dispositivos de segurança e invólucros robustos, para evitar tais problemas, porém há possibilidade de acidentes. Também deve ser projetada para o mau uso e tempo de vida.
- **Desempenho:** o funcionamento da bateria é afetado pelas condições do clima, pois são sensíveis ao frio e ao calor, havendo a necessidade de controle de temperatura. Sendo que, a energia para este controle de temperatura vem da própria bateria, fato este que acarreta redução no desempenho.
- **Ciclo de vida:** muitas das baterias utilizadas em VE's possuem garantia entre oito e dez anos ou 100 mil milhas. Principalmente em locais quentes e devido ao envelhecimento as baterias perdem a capacidade. Não existem dados com relação ao ciclo de vida para usos diferentes e outras temperaturas. Para alcançar o tempo de garantia os fabricantes super dimensionam os bancos

de bateria, com o objetivo de contrabalançar as perdas de capacidade.

- Energia específica: é a densidade de energia, refletindo na autonomia do VE.
- Potência específica: referente a capacidade de fornecer energia ao motor elétrico nas acelerações.
- Custo: para atender os itens de segurança, ciclo de vida, autonomia. Ainda é um entrave na popularização do VE, pois faz com que o valor final do veículo fique elevado.

2.5.1.1 Tipos de Baterias

Atualmente há cinco principais tipos de bateria utilizadas em VE's, nas subseções a seguir são descritas as principais características delas (BENTO, 2015; COSTA, 2009; MACHADO, 2015; LOPES et al., 2012):

2.5.1.1.1 Chumbo-Ácido (PbA)

- Utilizadas em veículos com MCI, mais comuns e baratas;
- Para utilização em VE's é necessária a substituição do eletrólito líquido por gel, o que aumenta o custo;
- São as recarregáveis mais baratas por kWh de carga;
- Baixa energia específica em torno de 20 a 35 Wh/kg;
- Potência específica em torno de 250 W/kg;
- Ciclos de vida em torno de 800 para 80% de capacidade;
- Não é favorável ao meio ambiente.

2.5.1.1.2 Níquel

- Níquel-Zinco: Ciclo de vida curto, menos nociva ao meio ambiente;
- Níquel-Ferro: Alto custo de manutenção, pesada, taxa de auto-descarga alta;
- Níquel-Cádmio: Efeito memória, materiais tóxicos, custo de manutenção alto, energia específica duas vezes maior que a de chumbo-ácido, alta potência específica, ciclo de vida longo, faixa de temperatura de operação de -40 °C a +80 °C, baixa auto-descarga, boa capacidade de armazenamento de energia,

robustas mecânica e eletricamente, podem ser recarregadas no período de 1 hora, tensão de operação de cada célula de 1,2V, o Cádmio tem alto custo e é ambientalmente nocivo;

- Níquel-hidreto metálico: Favorável ao meio ambiente, taxa de auto-descarga alta, energia específica aproximadamente 65 Wh/kg, potência específica em torno de 200W/kg, difícil obter modelo para tração, tensão de operação de cada célula de 1,2V, temperatura ambiente para operação, podem ser recarregadas no período de 1 hora, ciclo de vida longo;
- Cloreto de Níquel-Sódio (ZEBRA): Energia específica em torno de 100 Wh/kg, potência específica em torno de 150 W/kg, tensão de operação de cada célula de 2 V, poucos fornecedores comerciais, quanto a segurança é estável, temperatura de operação entre 300 °C e 350 °C, taxa de auto-descarga alta, tempo para recarga 8 horas, ciclo de vida longo, resistente à sobrecarga e sobre descarga.

2.5.1.1.3 Íon-Lítio

Na Tabela 3, são apresentados os principais tipos de bateria de íon-lítio, especificando a tensão de operação, limite de carga, ciclo de vida, temperatura de funcionamento, energia específica, carregamento, segurança e custo.

2.5.1.1.4 Zinco-Ar

Nesse tipo de bateria o ar atua como reagente no cátodo, e não fica armazenado dentro do dispositivo, já que é obtido de uma fonte externa, e além disso, o metal puro é usado como eletrodo, sendo bastante promissoras as baterias de metal-ar (FRANCISCO et al., 2020).

- Alta energia específica em torno de 230 Wh/kg;
- Alta densidade de energia em comparação com as de Lítio;
- Baixa potência específica em torno de 105 W/kg;
- Ciclo de vida superior a 2000;
- Necessidade de substituição dos elementos;
- Tensão de operação de cada célula de 1,2V;

Tabela 3 – Principais Tipos de Baterias de Íon-Lítio

| Especificações | Lítio-Cobalto LiCoO ₂ (LCO) | Lítio-Manganês LiMn ₂ O ₄ (LMO) | Lítio-Fosfato LiFePO ₄ (LFP) | NMC LiNiMnCoO ₂ |
|------------------------------|---|---|---|---|
| Tensão | 3,6V | 3,8V | 3,3V | 3,6V; 3,7V |
| Limite de Carga | 4,2V | 4,2V | 3,6V | 4,2V |
| Ciclo de Vida | 500-1000 | 500-1000 | 1000-2000 | 1000-2000 |
| Temperatura de Funcionamento | Média | Média | Boa | Boa |
| Energia Específica | 150-190 Wh/kg | 100-135 Wh/kg | 90-120 Wh/kg | 140-180 Wh/kg |
| Carregamento | 1C | 10C, pulso 40C | 35C contínua | 10C |
| Segurança | Média. Precisa de circuito de proteção e balanceamento de célula para blocos de múltiplas células . | | Muito seguro, precisa de equilíbrio celular e proteção em tensão. | Mais seguro do que LCO. Há necessidade de Proteção celular. |
| Custo Matéria prima | Alto | Alto | Alto | Alto |

Fonte: MACHADO (2015).

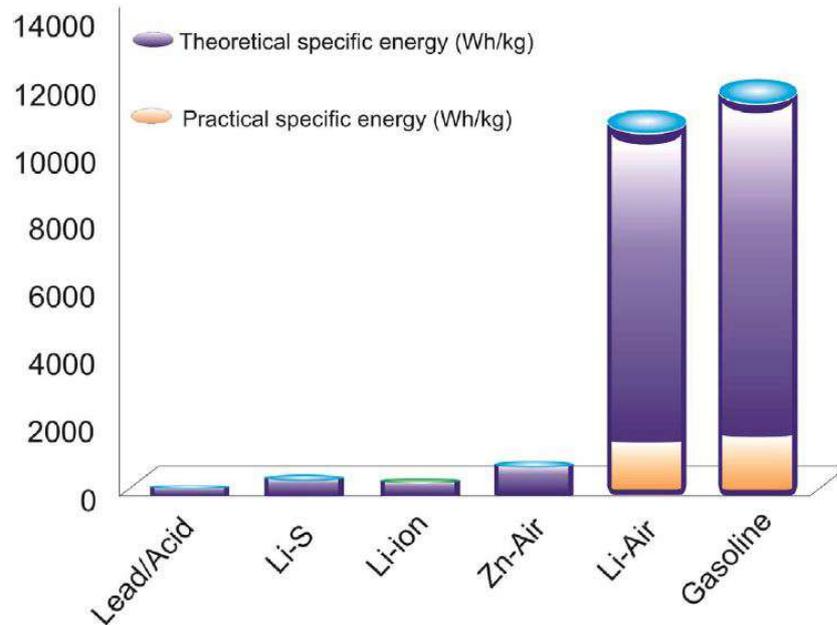
- Poucos fornecedores;
- Temperatura ambiente para operação;
- Taxa de auto-descarga alta.

Na sequência pode-se observar na Figura 21, a densidade energética de alguns tipos de baterias e também da gasolina. Pode ser observado que a bateria de *Li-Air* possui quase a mesma densidade energética da gasolina.

Contudo, quanto maior for a densidade energética, a densidade de potência e a inovação de tecnologia, maiores serão os valores das baterias.

Há diversos estudos relativo à novas tecnologias, ou novos materiais. Como por exemplo baterias de fluxo, baterias de Metal-Ar, com diferentes tipos de dopagem de materiais, entre outros.

Figura 21 – Densidade energética de alguns Tipos de Baterias e da Gasolina.



Fonte: Farooqui, Ahmad e Hamid (2017).

2.6 MÁQUINAS ELÉTRICAS

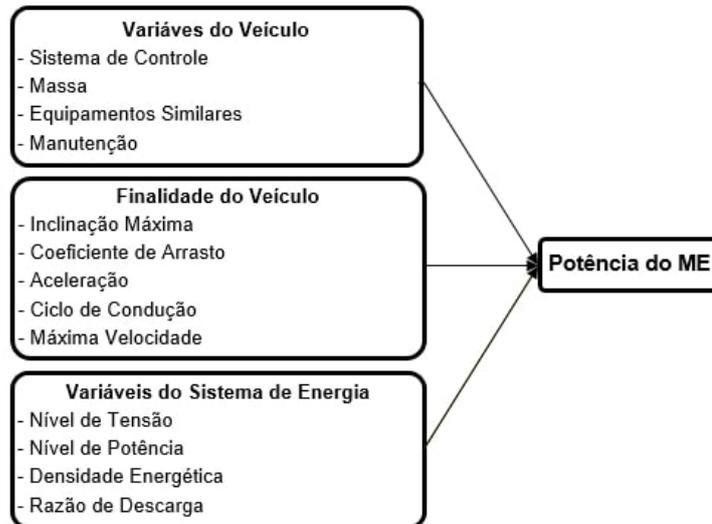
A função do motor elétrico (ME) é converter energia elétrica em energia mecânica, sendo também realizada a ação inversa, convertendo energia mecânica em energia elétrica, nessa função o motor elétrico passa a ser um gerador. Essas características são aproveitadas em um VE, a máquina elétrica funcionando como motor é usada para propulsionar o veículo, e durante as frenagens a mesma funciona como gerador recuperando parte da energia para carregar as baterias (EHSANI; GAO; EMADI, 2009; BENTO, 2015). É necessário considerar algumas condições relevantes para a escolha do ME a ser utilizado para a tração do VE, sendo elas apresentadas na Figura 22.

Algumas características importantes a ressaltar é que uma máquina elétrica com a mesma potência de um MCI terá menor tamanho e volume, também não são emissores de poluentes (SILVA, R. A., 2017).

Existem diversos modelos de máquinas elétricas rotativas, que variam entre máquinas de corrente contínua (CC) e de corrente alternada (CA). As máquinas de indução, síncronas, de relutância variável e *Brushless* de ímã permanente, estão classificadas entre as máquinas de corrente alternada, na Tabela 4 são apresentados as máquinas elétricas rotativas CA e CC.

Para aplicações em VE's os principais ME's utilizados são nas subseções a

Figura 22 – Interfaces de Potência para Escolha do ME.



Fonte: Adaptado de Bento (2015).

Tabela 4 – Máquinas Elétricas Rotativas

| | | |
|--------------------|----|--|
| | | Campo Série Campo Shunt Campo Composto Campo Independente Ímã Permanente |
| Máquinas Elétricas | CC | |
| | | Assíncronas de Indução |
| | CA | Rotor Bobinado Rotor Gaiola Rotor Bobinado Ímã Permanente Relutância Brushless de Ímã Permanente Relutância Variável |

Fonte: Adaptado de Rafael Atila Silva (2017).

seguir.

2.6.1 Motor de Indução (CA)

Este motor possui construção simples, é confiável, robusto, possui baixa manutenção, baixo custo, podendo operar em ambientes hostis. O limite máximo de velocidade pode ser aumentado devido à ausência de atrito da escova, aumentando o rendimento por conta do limite maior de velocidade. Variando a frequência da tensão consegue-se realizar o controle de velocidade dos motores de indução. Realizando o controle de orientação de campo do motor de indução é possível separar o controle de torque do controle de campo. Permitindo dessa maneira que o motor se comporte

como um motor CC excitado separadamente, porém não tendo as mesmas limitações de velocidade. No entanto, o controlador dos motores de indução tem custo maior em comparação com os controladores dos motores CC (XUE; CHENG; CHEUNG, 2008; BENTO, 2015).

2.6.2 Motor de Relutância Comutada (CA)

Neste caso, a estrutura de rotor é extremamente simples, não possuindo enrolamento, ímã, comutadores ou escovas. O motor possui boa tolerância a falhas. Como consequência pela construção simples e baixa inércia de rotor, o motor de relutância comutada possui uma aceleração muito rápida, e capacidade de operação de alta velocidade com uma região de potência constante. Possui torque de partida elevado e alta relação de torque-inércia. O motor de relutância comutada possui desvantagem com relação à ondulação no torque e ruído acústico. Porém, esses problemas não são cruciais na utilização em VE's (XUE; CHENG; CHEUNG, 2008; BENTO, 2015)

2.6.3 Motor de Ímã Permanente sem Escovas (CC)

Esses motores são conhecidos pela elevada eficiência e potência. Com o uso de ímãs permanentes é possível eliminar a necessidade de energia para a produção dos polos magnéticos no motor. Em consequência disso é possível alcançar eficiência maior que os motores CC, de indução, e relutância comutada. Ainda, o calor é dissipado de maneira eficaz para o meio. No entanto, a região de potência constante para os motores de ímã permanente é menor em comparação aos outros ME's, por conta do enfraquecimento de campo que é bastante limitada, decorrente da presença do campo do ímã permanente (ZERAOULIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006; XUE; CHENG; CHEUNG, 2008; BENTO, 2015).

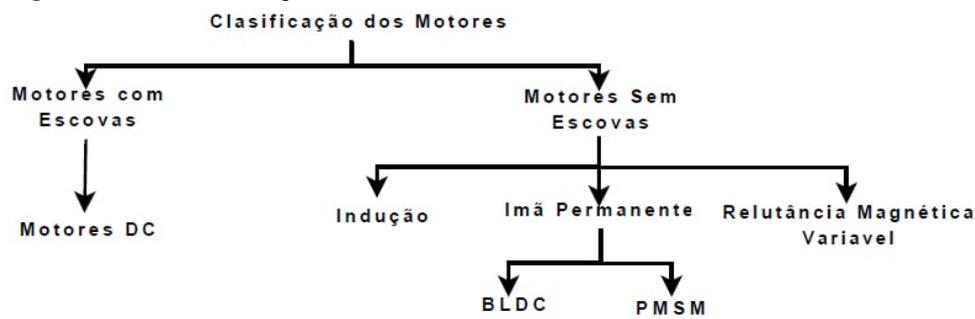
2.6.4 Motor de Corrente Contínua com Escovas (CC)

Em consequência de as características de torque-velocidade atenderem bem os requisitos de tração do VE, bem como o controle de velocidade ser relativamente simples, esses motores são utilizados em sistemas de propulsão elétrica. Contudo, o sistema

de controle de um motor CC é volumoso, tem baixa eficiência, baixa confiabilidade, e devido a presença da escova requer maior necessidade de manutenção. Possui alto torque com baixas velocidades, a velocidade é controlada com a variação da tensão. Podem-se encontrar motores com dois, quatro ou seis polos, isso depende da potência de saída e da tensão, podendo ter enrolamento de campo em série ou em derivação. Algumas restrições para o uso desse tipo de motor são; tamanho, peso e a restrição da velocidade em razão das escovas e do comutador (ZERAOUZIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006; XUE; CHENG; CHEUNG, 2008; BENTO, 2015).

Na Figura 23 pode-se observar uma classificação geral dos motores.

Figura 23 – Classificação Geral dos Motores.



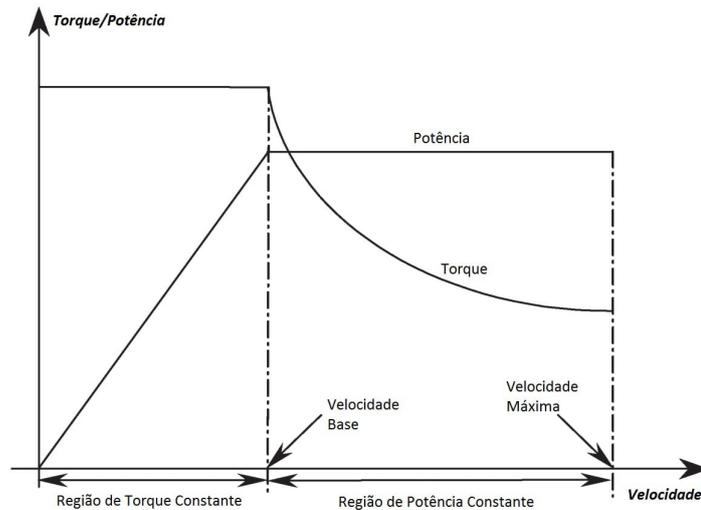
Fonte: Correa et al. (2013).

O comportamento dos motores elétricos é basicamente o mesmo com relação a torque e potência. A potência é linearmente crescente e o torque é constante até uma velocidade base. Ao chegar a esta velocidade base, até a velocidade máxima do motor a potência fica constante e ocorre redução de torque, conforme apresentado na Figura 24 (BENTO, 2015).

2.7 ACIONAMENTO DOS MOTORES ELÉTRICOS

Para acionar os ME's é necessário um conversor, o qual tem a função de converter o valor de tensão, corrente ou frequência para um valor adequado para a aplicação nos motores, dessa forma realizando o controle de velocidade. Alguns exemplos típicos utilizados em VE's são os recortadores (CC-CC), os inversores (CC-CA), os retificadores (CA-CC) e os ciclo conversores (CA-CA) (BOTTURA; BARRETO, 1989; BENTO, 2015). Para os projetos de circuitos eletrônicos de potência para VE's é necessário abordar algumas questões (CHAN, 2007; BENTO, 2015), sendo elas:

Figura 24 – Comportamento de Torque e Potência de um ME.



Fonte: Bento (2015).

- Projeto Elétrico: projeto do circuito de comutação, do circuito controlador, dispositivo de seleção de comutação, otimização da conversão de frequência e o cálculo de perdas;
- Projeto do algoritmo de controle: necessário para alcançar a tensão, corrente e frequência desejada na saída, e para realizar o fluxo de potência bidirecional;
- Projeto magnético: projeto de indutores, capacitores e outros componentes magnéticos necessários para a filtragem, comutação e unidades de acionamento.

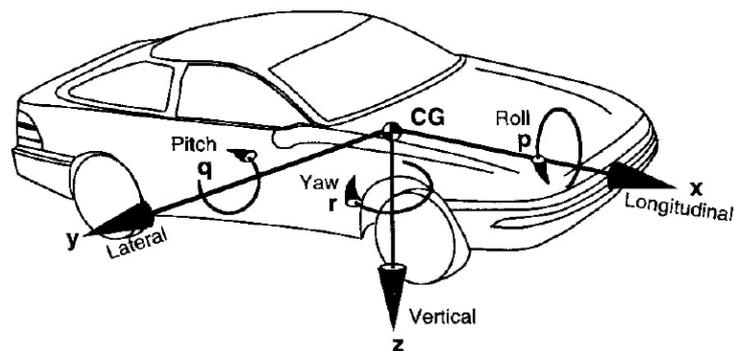
2.8 DINÂMICA VEICULAR

De acordo com Gillespie (1992) e Max Mauro Dias Santos (2020) para movimentar um veículo faz-se necessário vencer as forças que se opõem ao movimento:

- Forças de inércia: são dependentes da massa e das variações de velocidade;
- Forças gravitacionais: são dependentes da massa e da inclinação do pavimento;
- Forças aerodinâmicas: são dependentes do formato do veículo, da velocidade do vento e da velocidade do próprio veículo;
- Fricção interna: são dependentes do atrito das peças rotativas;
- Força de resistência ao rolamento: São dependentes do tipo de pavimento e da pressão dos pneus.

O estudo da dinâmica veicular usualmente é dividido entre três eixos, os quais correspondem aos eixos longitudinal, lateral e vertical, previsto na norma J670 (*Vehicle Dynamics Terminology*) da Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE), na Figura 25 são indicados os eixos descritos anteriormente (GILLESPIE, 1992; CORREA et al., 2013; SANTOS, M. M. D., 2020).

Figura 25 – Disposição normalizada dos eixos de um automóvel (SAE J670).



Fonte: Gillespie (1992).

Onde:

x - movimentos longitudinais, considerando positivo para frente do veículo;

y - movimentos laterais, sendo positivo para o lado direito do veículo;

z - movimentos verticais, positivos para baixo em relação ao veículo;

p - velocidade de rolagem (*roll*) em torno do eixo x;

q - velocidade de arfagem (*pitch*) em torno y;

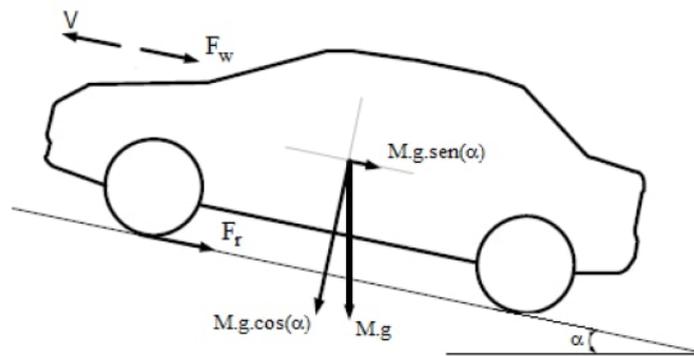
r – velocidade de guinada (*yaw*) em torno do eixo z;

CG – centro de gravidade.

As funções de aceleração e frenagem estão profundamente conexas com a dinâmica longitudinal, a qual está relacionada com o deslocamento do eixo principal do veículo (eixo x), também estuda rotações em torno do eixo y. Os principais componentes dessa dinâmica são carroceria e o conjunto propulsor, onde identifica-se o motor, transmissão e rodas. A dinâmica lateral relaciona-se com o esterçamento das rodas, por meio do eixo do volante, o que possibilita a mudança de direção do veículo; deslocamento no eixo y, estuda também rotações em torno do eixo x e z. Já a dinâmica vertical estuda o movimento vertical no sentido do eixo z, em função das irregularidades do pavimento, estudando também as rotações em torno dos eixos x e y (GILLESPIE, 1992; CORREA et al., 2013; DIAS, 2013).

Na Figura 26 pode-se observar as forças atuantes na direção longitudinal do movimento de um veículo. Neste caso, é considerado um veículo com massa M , subindo uma rampa com angulação α , se movimentando com uma velocidade V . A força de tração do veículo deverá vencer a resistência ao rolamento, a resistência aerodinâmica, o aclone e fornecer aceleração suficiente para alcançar a velocidade desejada, conforme serão definidas cada uma das resistências nas subseções mais a frente (GILLESPIE, 1992):

Figura 26 – Forças atuantes em um veículo.



Fonte: Gillespie (1992).

Existem diversas metodologias para dimensionar o sistema de tração para veículos elétricos fundamentada na dinâmica veicular, uma delas considera três condições de operação (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997):

- Aceleração inicial;
- Velocidade nominal do veículo;
- Velocidade máxima do veículo.

É afirmado que as restrições básicas de projeto para sistemas de tração para VE's são satisfeitas com as três condições, pois ao atender as condições acima elencadas o sistema de tração atuará de maneira satisfatória nos demais regimes de operação (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997).

As restrições de projeto são definidas pelos parâmetros que seguem:

- Velocidade nominal do veículo;
- Tempo especificado para o veículo atingir a velocidade nominal;
- Velocidade máxima do veículo;
- Massa do veículo (e outras grandezas físicas).

O propósito é satisfazer às restrições de projeto utilizando a menor potência, isto é, otimizar o perfil de torque-velocidade para o sistema de tração elétrica atendendo as

condições operacionais, reduzindo peso, volume e custo (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997; ZULKIFLI et al., 2015).

Os parâmetros que devem ser considerados para um sistema de tração são:(EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997; TANAKA, 2013):

- Potência nominal do ME;
- Velocidade nominal do motor;
- Velocidade do motor;
- Extensão além da velocidade nominal do motor na faixa de operação a potência constante;
- Relação de transmissão entre a ponta de eixo do motor e o eixo das rodas.

A modelagem dos sistemas mecânicos proporciona afirmativa indiscutível da performance da aceleração de um veículo para o qual a potência do motor de tração é transmitida ao pavimento. Faz-se necessário considerar alguns pressupostos simplificadores para medir a aceleração de um veículo partindo do torque fornecido pelo sistema de propulsão, conforme segue (GILLESPIE, 1992; CORREA et al., 2013):

- Os eixos da roda e do motor são corpos rígidos e possuem massa constante;
- Não existe folga nem deslizamento no contato entre os eixos por meio do diferencial;
- As variações das grandezas do sistema são desprezíveis, com o objetivo de manter a linearidade no comportamento do sistema.

A potência do motor e o limite de tração nas rodas em contato com o pavimento são dois limitantes da máxima performance da aceleração longitudinal de um veículo motorizado, onde a velocidade é determinante de qual limite prevalece. A tração nos pneus é o fator limitante em baixas velocidades, sendo que a potência disponível no motor é o fator limitante para altas velocidades (GILLESPIE, 1992; CORREA et al., 2013).

Com relação às forças que se opõem ao movimento, pode-se considerar as que seguem na Seção 2.8.1 (GILLESPIE, 1992; EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997; TANAKA, 2013).

2.8.1 Forças de Resistência ao Movimento do Veículo

A velocidade, as acelerações e as forças de resistência são determinantes para especificar a energia necessária para o movimento do veículo. As forças resistentes que devem ser vencidas podem ser divididas em quatro subgrupos (GILLESPIE, 1992; CORREA et al., 2013; SANTOS, M. M. D., 2020):

- Resistência ao rolamento;
- Resistência aerodinâmica;
- Forças devido a inclinação do pavimento;
- Resistência das forças de inércia.

2.8.1.1 Resistência ao rolamento

Também conhecido como rolamento de fricção ou arraste de rolamento, a resistência acontece quando um objeto redondo como uma bola ou cilíndrico como um pneu rola em uma superfície plana, com velocidade constante e em linha reta. Uma das causas principais é a deformação do objeto, da superfície ou ambas. Outros fatores podem contribuir para a resistência, como o raio da roda, a velocidade, a adesão superficial, a relação de micro deslizamento entre as áreas de contato. Todas essas características são dependentes do material da roda ou do pneu e o tipo de pavimento (TANAKA, 2013).

A resistência ao rolamento é proporcional ao peso do veículo e os principais fatores que a afetam são o tipo e a pressão dos pneus, e o tipo de pavimento. Para calcular a resistência ao rolamento pode-se utilizar a Equação 2 (GILLESPIE, 1992; EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997);

$$F_r = f_r M g \cos(\alpha) \quad (2)$$

Onde:

F_r = Força de resistência ao rolamento(N);

M = peso do veículo em (kg);

f_r = coeficiente de resistência ao rolamento;

g = aceleração da gravidade;

α = ângulo de inclinação da pista.

O coeficiente de resistência ao rolamento (f_r) é dependente de diversos fatores como o tipo do pavimento, pressão interna dos pneus, temperatura, carga radial dos pneus. Para veículos de passeio em pista de concreto, é possível calcular utilizando a Equação 3 (FERREIRA, A. A. et al., 2007).

$$f_r = 0.01 * (1 + 0.01 * v(t)) \quad (3)$$

Onde: $v(t)$ é a velocidade instantânea do veículo em (m/s).

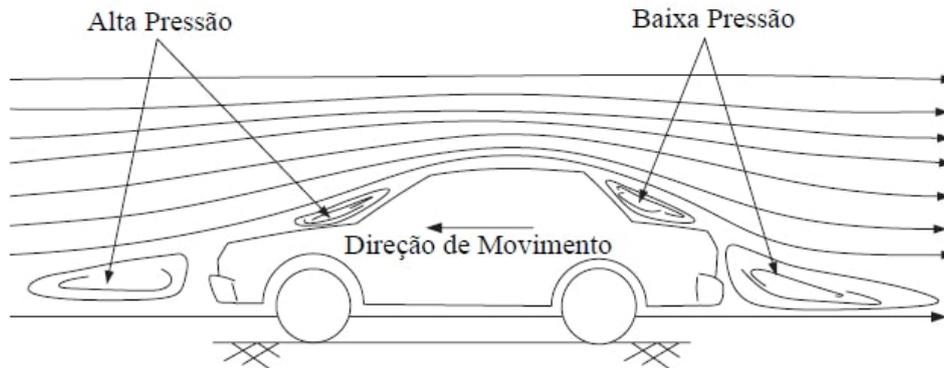
2.8.1.2 Resistência aerodinâmica

Esta força resistente ao movimento do veículo é devido à resistência do ar que age em sentido contrário ao movimento veicular. É dependente da velocidade do veículo, da velocidade do vento, e da área frontal do veículo (GILLESPIE, 1992; EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997; SANTOS, M. M. D., 2020).

A resistência aerodinâmica tem relação direta com a forma do veículo e a fricção superficial.

- Arrasto de forma: ocorre quando o ar é empurrado pelo movimento do veículo. Porém o ar não sai imediatamente do caminho, assim a pressão aumenta, o que resulta em alta pressão do ar. Além do mais, não é possível para o ar preencher imediatamente o espaço deixado pelo veículo no movimento para frente, criando uma zona de baixa pressão. Portanto, o movimento do veículo cria uma alta pressão na frente, o que empurra o veículo para trás, e uma baixa pressão na traseira, o que faz puxar o veículo para trás. Essa situação é mostrada na Figura 27. A denominação arrasto de forma deve-se ao fato deste arrasto ser totalmente definido pela forma do veículo; (GILLESPIE, 1992).
- Fricção superficial: ocorre quando o ar que está próximo do veículo se desloca quase com a mesma velocidade do veículo, enquanto que o ar mais afastado permanece quase parado. Assim, no meio, as moléculas de ar movem-se com uma abundante gama de velocidades. A diferença de velocidade entre duas moléculas produz a fricção superficial (GILLESPIE, 1992).

Figura 27 – Arrasto de forma na resistência aerodinâmica.



Fonte: Ehsani, Gao e Emadi (2009).

Logo, o arrasto aerodinâmico é função da velocidade do veículo V_v , da área frontal A_f , da forma do veículo, e da densidade do ar ρ_a . Conforme Equação 4

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V_v - V_w)^2 \quad (4)$$

Onde:

F_w = Força de arrasto aerodinâmico (N);

ρ_a = densidade do ar;

A_f = área frontal do veículo em (m^2);

C_D = coeficiente de arrasto aerodinâmico;

V_v = velocidade do veículo em ($\frac{m}{s}$);

V_w = velocidade do vento em ($\frac{m}{s}$).

A temperatura, a altitude e a umidade influenciam na densidade do ar. Porém, pode-se utilizar o valor de $1,25 \text{ kg/m}^3$, pois é um valor razoável na maioria dos casos. Na Figura 28, são apresentados alguns valores do coeficiente de arrasto (C_D) para diferentes formas de veículos.

2.8.1.3 Resistência ao aclive

Quando um veículo está em deslocamento em um aclive, uma componente de seu peso irá atuar na direção da descida, conforme ilustrado na Figura 26. Na subida, essa componente do peso se opõem ao movimento, e na descida ajuda o movimento. Contudo, para analisar o desempenho somente é considerado para as

Figura 28 – Coeficientes de arrasto em função da forma do veículo.

| Tipo de Veículo | | Coeficiente de Resistência Aerodinâmica |
|--|---|---|
|  | Conversível aberto | 0,5...0,7 |
|  | Van | 0,5...0,7 |
|  | Sedan | 0,4...0,55 |
|  | Formato de cunha | 0,3...0,4 |
|  | Formato de cunha com carenagem envolvente | 0,2...0,25 |
|  | Hatchback | 0,23 |
|  | Design simplificado otimizado | 0,15...0,20 |
| Caminhões | | 0,8...1,5 |
| Ônibus | | 0,6...0,7 |
| Ônibus simplificado | | 0,3...0,4 |
| Motocicletas | | 0,6...0,7 |

Fonte: Ehsani, Gao e Emadi (2009).

subidas. A Equação 5, é conforme apresentada na revisão da bibliografia (GILLESPIE, 1992; ECKERT et al., 2017).

$$F_g = Mgsen(\alpha) \quad (5)$$

Onde:

F_g = Força de resistência ao aclave (N);

M = peso do veículo em (kg);

g = aceleração da gravidade;

α = ângulo de inclinação da pista.

Com relação à inclinação, de acordo com Rio Grande do Sul e Alegre (2007) a inclinação percentual é referida pela tangente, por exemplo para subir 18 m é necessário ocorrer um deslocamento horizontal de 100 m, o que representa uma inclinação de 18%, ou aproximadamente 10°. Ainda, o artigo “Inclinação das Ruas e Estradas” Rio Grande do Sul e Alegre (2007), apresenta diversos exemplos de inclinação, sendo um

bastante conhecido a Serra do Rio do Rastro em Santa Catarina como apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Rampa com inclinação excepcionalmente grande (10° ou 18%) em um trecho da Rodovia SC 480 na Serra do Rio do Rastro.



Fonte: Rio Grande do Sul e Alegre (2007).

2.8.1.4 Aceleração

Para um veículo que é um conjunto de inércias em translação e rotação, para calcular a força a ser aplicada para variar a velocidade deve-se considerar, além das massas em translação, as inércias rotativas. Pois, as inércias rotativas durante a aceleração do veículo podem ser responsáveis por uma grande parcela do consumo de portanto quando submetidas a acelerações angulares proporcionais a linear, devido às relações de transmissão do diferencial (GILLESPIE, 1992). Para se obter a aceleração necessária pode ser utilizada a Equação 6 (GILLESPIE, 1992; EHSANI; RAHMAN;

TOLIYAT, 1997).

$$a = \left(\frac{F_t - (F_r + F_w + F_g)}{\delta M} \right) \quad (6)$$

Onde:

a = aceleração do veículo em (m/s);

F_t = força total em (N);

E δ é o coeficiente de momento de inércia para equiponderar o aparente aumento na massa do veículo relacionado ao momento de inércia das massas girantes do sistema de tração.

Pode-se considerar alguns passos para um projeto de um veículo elétrico com tração independente em duas rodas (PEREZ-PINAL et al., 2006):

- Definir a relação entre torque mecânico e o estágio eletrônico de potência incluindo o motor elétrico;
- Definir a potência mecânica necessária;
- Definir a potência elétrica necessária ao estágio eletrônico de potência.

Para definir a potência mecânica pode-se utilizar duas técnicas. Uma considera a potência máxima necessária para o VE realizar um ciclo de condução. A segunda técnica considera a determinação da potência mecânica média necessária, considerando a velocidade inicial, o tempo de aceleração e a velocidade máxima (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997).

Para calcular a potência mecânica utilizando o ciclo de condução do veículo é preciso determinar as forças que se opõem ao movimento (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997).

Para calcular a potência mecânica utilizada e a potência mecânica média são necessárias quatro etapas (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997);

- Estimar a potência nominal do acionamento do motor;
- Determinar o tempo de aceleração;
- Determinar a distância de aceleração;
- Projetar a relação de transmissão de maneira que o veículo atinja a máxima velocidade na máxima rotação do motor.

A potência de tração total necessária para acelerar o veículo de zero a velocidade V_f em t_a segundos pode ser obtida conforme a Equação 7 (FERREIRA, A. A.

et al., 2007; ECKERT et al., 2017).

$$P_t = \left[M \frac{dV}{dt} + M g \sin(\alpha) + f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V_v - V_w)^2 \right] V \quad (7)$$

Se for considerar o fator de massa δ , fica como na Equação 8 (FERREIRA, A. A. et al., 2007; ECKERT et al., 2017).

$$P_t = \left[\delta M \frac{dV}{dt} + M g \sin(\alpha) + f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V_v - V_w)^2 \right] V \quad (8)$$

Onde: P_t é a potência total requerida.

Para se obter o consumo de energia em um período de tempo, como durante um ciclo de condução, basta integrar o consumo total de energia no tempo. A potência total consumida, em um instante de tempo determinado, pode ser obtida pela Equação 9 (FERREIRA, A. A. et al., 2007; ECKERT et al., 2017).

$$P_{tot} = \frac{V}{\eta_t \eta_m \eta_{cc}} \left[\delta M \frac{dV}{dt} + M g \sin(\alpha) + f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V_v - V_w)^2 \right] \quad (9)$$

Onde: P_{tot} é a potência total requerida considerando os rendimentos.

É possível calcular a potência regenerada durante a frenagem regenerativa, conforme a Equação 10 (FERREIRA, A. A. et al., 2007; ECKERT et al., 2017).

$$P_{reg} = \frac{\xi V}{\eta_t \eta_m \eta_{cc}} \left[\delta M \frac{dV}{dt} + M g \sin(\alpha) + f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a A_f C_D (V_v - V_w)^2 \right] \quad (10)$$

Onde:

P_{reg} é a potência total regenerada considerando os rendimentos em (W);

ξ é o fator de frenagem regenerativa, sendo representada em porcentagem da energia total da frenagem que pode ser regenerada, ($0 < \xi < 1$).

η_t = rendimento total da transmissão.

η_m = rendimento do motor.

η_{cc} = Rendimento do controlador/conversor de potência.

δ = Coeficiente do momento de inércia.

ρ_a = Densidade do ar.

Portanto, o balanço do consumo de energia pode ser obtido conforme apresen-

tado na Equação 11 (TANAKA, 2013; WANG; GUO; YANG, F., 2015).

$$E_{out} = \int_{tracao} P_{tot} dt + \int_{frenagem} P_{reg} dt \quad (11)$$

Onde:

E_{out} é o balanço do consumo de energia em (Wh).

É importante observar que nesta equação a potência de frenagem é negativa.

3 CONCEPÇÃO E DEFINIÇÃO DO SISTEMA

Como apresentado no Capítulo 2 os VE's e VEH's não são algo novo, no entanto, o custo de alguns dos seus componentes é bastante elevado, desta maneira os VEH's são uma boa alternativa para ganho em eficiência energética e redução em emissão de poluentes em comparação aos veículos convencionais equipados com MCI. Contudo, é necessário encontrar uma configuração que propicie o melhor desempenho, para auxiliar nesta escolha existem *softwares* que realizam análise de desempenho e emissão de poluentes.

Isto exposto, neste capítulo serão apresentados: o software escolhido para auxiliar nas simulações, as modificações realizadas no diagrama de blocos da configuração do VEH paralelo para conseguir a configuração de um VEH paralelo de eixos separados por não haver disponível na *tool box* do *software* tal configuração, os parâmetros, as definições e as configurações dos veículos para as simulações.

3.1 MATLAB

Para as simulações realizadas neste trabalho, foi utilizado o *software* MatLab, sendo este de alta performance para realização de cálculos numéricos, criado no fim dos anos 1970. Com esta ferramenta, é possível realizar cálculos com matrizes, processamento de sinais, além é claro, a construção de gráficos. Sua programação é do tipo alto nível com uma linguagem em blocos por meio do Simulink (umas das interfaces do programa), porém o *software* permite também trabalhar com linhas de programação, derivadas do C/C++, em suas interfaces de comando (SALEKI; REZAZADE; CHANGIZIAN, 2017; PRATHIBHA; SAMUEL; UNNIKRISHNAN, 2020).

Devido sua alta flexibilidade, o MatLab se torna especialista em diversos campos de atuação, como elementos finitos, inteligência artificial e análise de sinais por exemplo. Com sua grande popularidade, nos dias atuais é fácil encontrar guias introdutórios, bem como materiais avançados e artigos relacionados. O MatLab costuma ser uma das primeiras opções quando o assunto é resolver função, realizar uma rápida simulação e visualizar resultados, além de ser largamente utilizado em cursos de graduação em engenharia, mestrado e doutorado (SALEKI; REZAZADE; CHANGIZIAN, 2017; PRATHIBHA; SAMUEL; UNNIKRISHNAN, 2020).

3.1.1 ADVISOR (*Advanced Vehicle Simulator*)

Advanced Vehicle Simulator (ADVISOR), é um modelo de simulação veicular, com dados e códigos para uso no MatLab e Simulink. Seu objetivo maior é para realizar rápidas análises de desempenho e economia de combustível de veículos convencionais, elétricos e híbridos. Oferece uma vasta biblioteca para trem de força veicular convencional, para simulações e análises detalhadas, e seus respectivos componentes, utilizando a flexibilidade do Simulink e a capacidade analítica do MatLab (SALEKI; REZAZADE; CHANGIZIAN, 2017; PRATHIBHA; SAMUEL; UNNIKRISHNAN, 2020).

Desenvolvido em novembro de 1994, no *National Renewable Energy Laboratory*, seu principal objetivo era auxiliar o Departamento de Energia dos Estados Unidos a desenvolver tecnologias para veículos híbridos, em parcerias com Ford, General Motors e Daimler Chrysler (SALEKI; REZAZADE; CHANGIZIAN, 2017; PRATHIBHA; SAMUEL; UNNIKRISHNAN, 2020).

Sua primeira publicação foi via internet em setembro de 1998, e o número de usuários foi crescendo de forma muito rápida, de um grupo de 30 usuários para mais de 4500 downloads individuais. Em sua maioria cerca de 68% dos usuários faziam parte da indústria, enquanto o restante era do meio acadêmico e uma pequena parcela de entidades governamentais. Com o grande aumento do uso do ADVISOR, a necessidade de aumentar a biblioteca de modelos e componentes para simulação veio junto de uma série de atualizações de versões, distribuídas sempre via internet (SALEKI; REZAZADE; CHANGIZIAN, 2017; PRATHIBHA; SAMUEL; UNNIKRISHNAN, 2020).

O ADVISOR foi criado no meio MatLab/Simulink, devido a fácil programação baseadas em matrizes, com alta performance juntamente com a representação de sistemas complexos demonstrados graficamente por meio de um diagrama de blocos. O veículo em simulação é montado por meio de blocos, utilizando diagrama do Simulink, e então o modelo é lido como entrada no MatLab durante a simulação, gerando assim os devidos resultados na respectiva janela (SALEKI; REZAZADE; CHANGIZIAN, 2017; PRATHIBHA; SAMUEL; UNNIKRISHNAN, 2020).

Os veículos podem ser montados por meio de uma biblioteca existente no ADVISOR, sendo assim, inúmeras formas e combinações podem ser feitas para se obter os mais diversos resultados. Características de desempenho, tamanho dos com-

ponentes e entre outros fatores podem ser editados, alterando suas características e por consequência o resultado na simulação. Todos os modelos criados para simulação podem ser salvos para serem utilizados em outro momento e/ou comparativo (SALEKI; REZAZADE; CHANGIZIAN, 2017; PRATHIBHA; SAMUEL; UNNIKRISHNAN, 2020).

Na tela de simulação do ADVISOR, os parâmetros de simulação como por exemplo o ciclo de funcionamento pode ser editado para criar as mais diversas situações. Por fim, após simulado, o software permite reavaliar os resultados de desempenho, podendo alguns destes serem dinamicamente modificados para mostrar outros resultados, como por exemplo a rotação do motor, torque e tensão de bateria (SALEKI; REZAZADE; CHANGIZIAN, 2017; PRATHIBHA; SAMUEL; UNNIKRISHNAN, 2020).

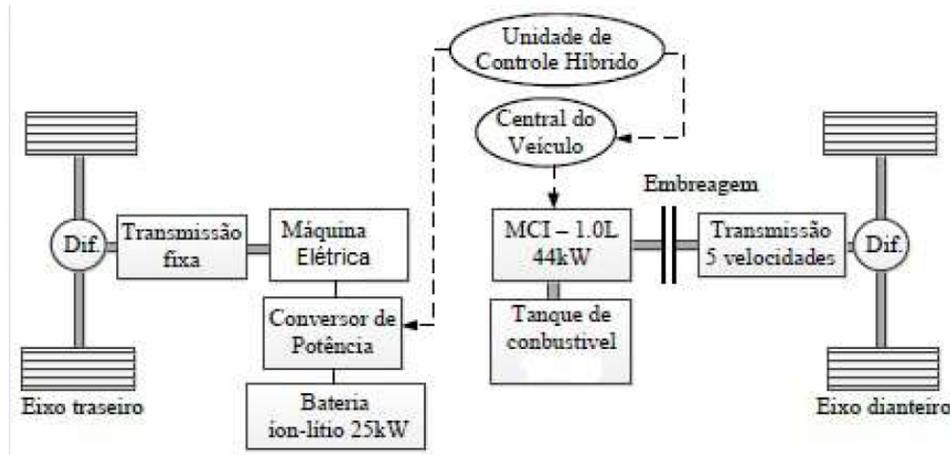
Com os benefícios do ADVISOR, é possível que o usuário verifique por exemplo se o veículo consegue seguir o trajeto imposto, consumo de combustível, consumo de energia elétrica requerida para funcionamento, quais foram os picos de energia gerados a partir dos componentes do trem de força do veículo, qual foi a distribuição de torque gerado pelo motor, eficiência da transmissão e entre outros muitos fatores. Porém, o ADVISOR foi desenvolvido para ser uma ferramenta de análise, e não para desenvolvimento de novas partes, por isso alguns aspectos não podem ser previstos pelo *software* como vibrações físicas, oscilações de campo elétrico e alguns outros fatores dinâmicos. Uma alternativa para estas faltas, é utilizar em parceria outras ferramentas disponíveis no mercado como *Saber* e *Sinda* (SALEKI; REZAZADE; CHANGIZIAN, 2017; PRATHIBHA; SAMUEL; UNNIKRISHNAN, 2020).

ADVISOR é comumente utilizado para realizar análises de consumo de combustível, desempenho e emissões de veículos que fazem uso de tecnologias alternativas ao tradicional MCI. Essa poderosa ferramenta consegue simular diferentes situações com diversos cenários de operação para aquisição de dados sem a necessidade de realizar interação com outros *softwares*. Comumente é escolhido para ser utilizado em otimização de sistemas veiculares, inclui múltiplos modelos de células de combustível e baterias, variando conforme o grau de complexidade, sendo utilizado largamente por universidades, montadoras e governos, que visam no desenvolvimento de novas tecnologias para sistemas veiculares híbridos (SALEKI; REZAZADE; CHANGIZIAN, 2017; PRATHIBHA; SAMUEL; UNNIKRISHNAN, 2020).

3.2 MODIFICAÇÕES NO ADVISOR

A arquitetura paralela de eixos separados não está disponível na biblioteca do ADVISOR, portanto para poder simular esta arquitetura no referido *software* é necessário desenvolver um diagrama de blocos do mesmo, uma maneira para se obter tal configuração é promover as mudanças necessárias para desacoplar os eixos dianteiro e traseiro da configuração de um VEH paralelo disponível na biblioteca do referido *software*, na sequência serão apresentadas as mudanças realizadas. Essa arquitetura facilita a modificação de um veículo convencional, não havendo necessidade de mudança na estrutura do MCI e sistemas de transmissão, pois as mudanças ocorrem no eixo oposto ao sistema composto pelo MCI, ocorrendo a conexão elétrica entre esses sistemas por meio da unidade de controle híbrido, a qual integra e controla os sistemas de propulsão elétrica e mecânica com base nas estratégias de controle (SILVA, R. A., 2017). Na Figura 30 é apresentada a arquitetura proposta.

Figura 30 – Arquitetura VEH Paralelo Eixos Separados



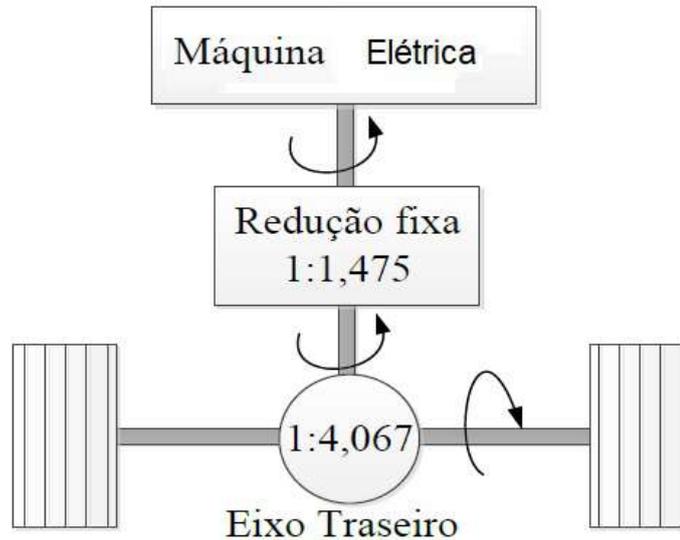
Fonte: Adapto de Rafael Atila Silva (2017).

Em conformidade com o objetivo do presente trabalho e devido não haver na biblioteca do *software* ADVISOR a arquitetura híbrida paralela de eixos separados, seria necessário construir um diagrama de blocos para realizar os cálculos desta arquitetura, ou uma maneira menos complexa é fazer modificações no diagrama de blocos da arquitetura híbrida paralela convencional, "*Parallel_defaults_in*".

Com relação à transmissão para o sistema de tração elétrica devem ser especificados os valores das reduções do sistema de transmissão, pois estes valores serão utilizados nos cálculos de velocidade e torque requeridos. Na Figura 31 são

apresentados os valores dessas reduções, onde a relação do diferencial é 1:4,067 e ainda possui uma redução fixa de 1:1,475, sendo aplicada uma redução aproximada de seis vezes (SILVA, R. A., 2017).

Figura 31 – Sistema de Transmissão da Propulsão Elétrica



Fonte: Adaptado de Rafael Atila Silva (2017).

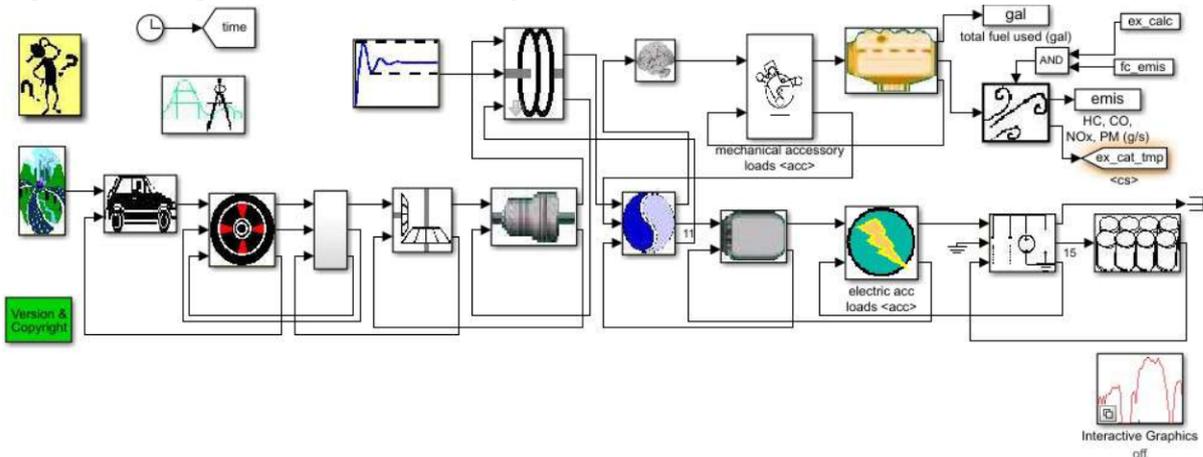
Na arquitetura híbrida paralela disponível na biblioteca do ADVISOR, os sistemas de propulsão mecânica e elétrica estão acoplados por meio de um conversor de torque à caixa de marchas e ao diferencial.

Na Figura 32 é apresentado o diagrama de blocos da arquitetura paralela convencional, onde na parte superior estão os blocos do sistema de tração mecânica, o MCI está conectado ao acoplamento mecânico de torque por meio da embreagem. O bloco de demanda de potência das cargas mecânicas do veículo está entre a embreagem e o MCI. Os blocos que calculam os níveis de emissões de poluentes e do consumo de combustível estão à direita do bloco do MCI. Podem ser observado dois blocos de controle do sistema híbrido entre os blocos de embreagem e MCI, sendo que o primeiro envia referências para o bloco de embreagem e o segundo faz o controle das demandas de potência e torque do MCI.

O sistema de tração elétrica está disposto na parte inferior, onde o ME está conectado ao acoplamento de torque mecânico junto com o sistema do MCI. Os motores de propulsão estão conectados ao sistema de transmissão por meio deste acoplamento. Após o conversor de torque estão os blocos do ME do *drive* e de controle do acionamento, integrados no mesmo bloco. Na sequência à direita estão as cargas elétricas do veículo,

o conversor de potência e o sistema de armazenamento de energia.

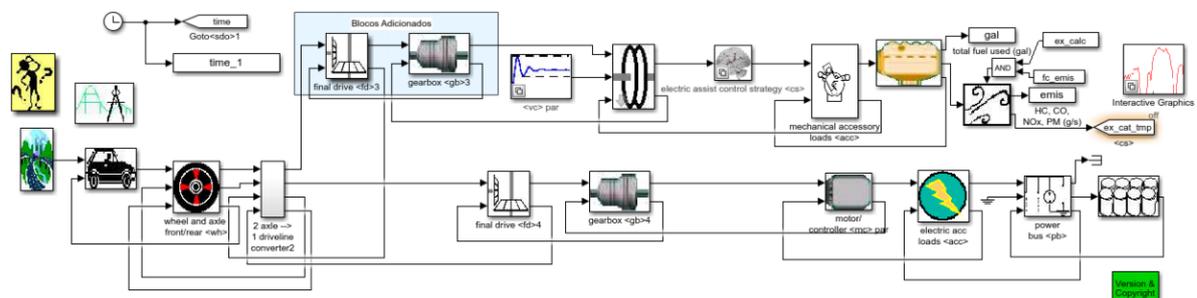
Figura 32 – Diagrama de blocos híbrido paralelo do ADVISOR



Fonte: **Software ADVISOR..**

Para poder realizar o desacoplamento dos sistemas de tração apresentado em Figura 32, deixando os dois eixos com possibilidade de tração, são necessárias algumas mudanças neste diagrama de blocos. Na Figura 33 pode ser verificado que foram inseridos dois novos blocos na parte superior (destacados com o polígono na cor azul), nos quais são realizados os cálculos referentes ao torque e à velocidade finais entregues ao sistema de tração e os cálculos referentes à caixa de marchas. E foi retirado o bloco de acoplamento de torque, realizando desta maneira o desacoplamento mecânico da propulsão elétrica e da propulsão com o MCI.

Figura 33 – Diagrama de blocos do modelo do VEH paralelo de eixo separado modificado no ADVISOR

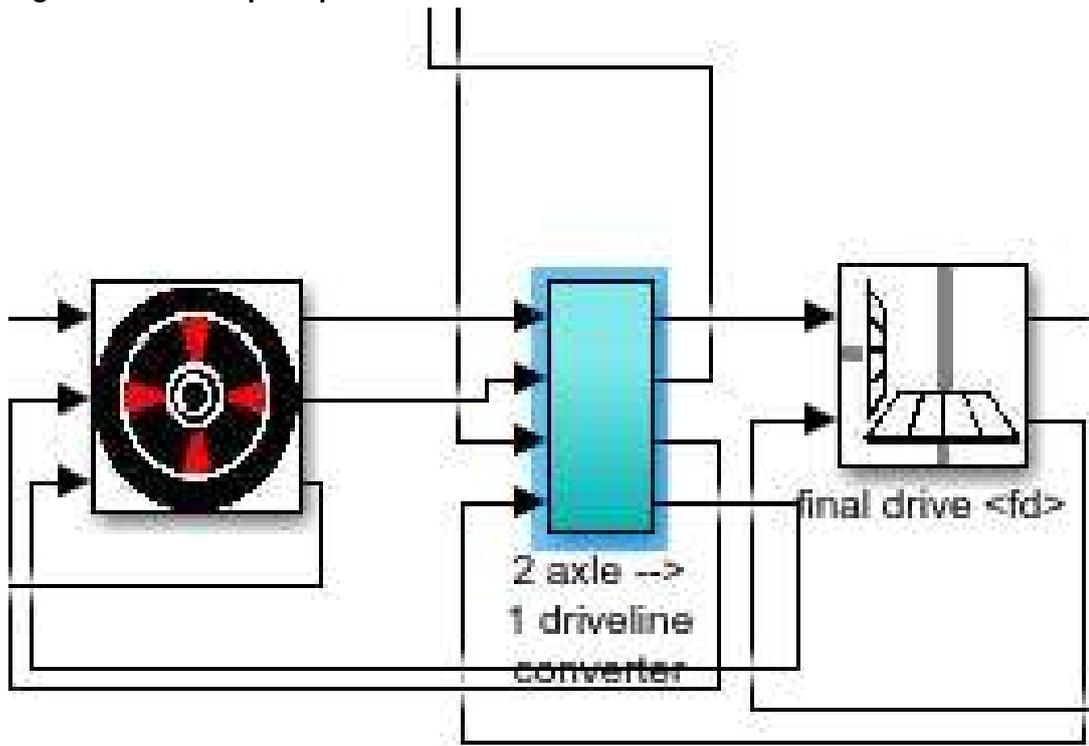


Fonte: **Software ADVISOR..**

A referência de demanda de torque e velocidade para o sistema de tração dos eixos dianteiro e traseiro é gerada no bloco que representa as rodas e eixos do veículo. Neste bloco é verificado qual eixo está ativo, sendo direcionada a demanda para o diferencial do sistema de tração que está ativo, dianteiro, traseiro ou ambos. Para poder

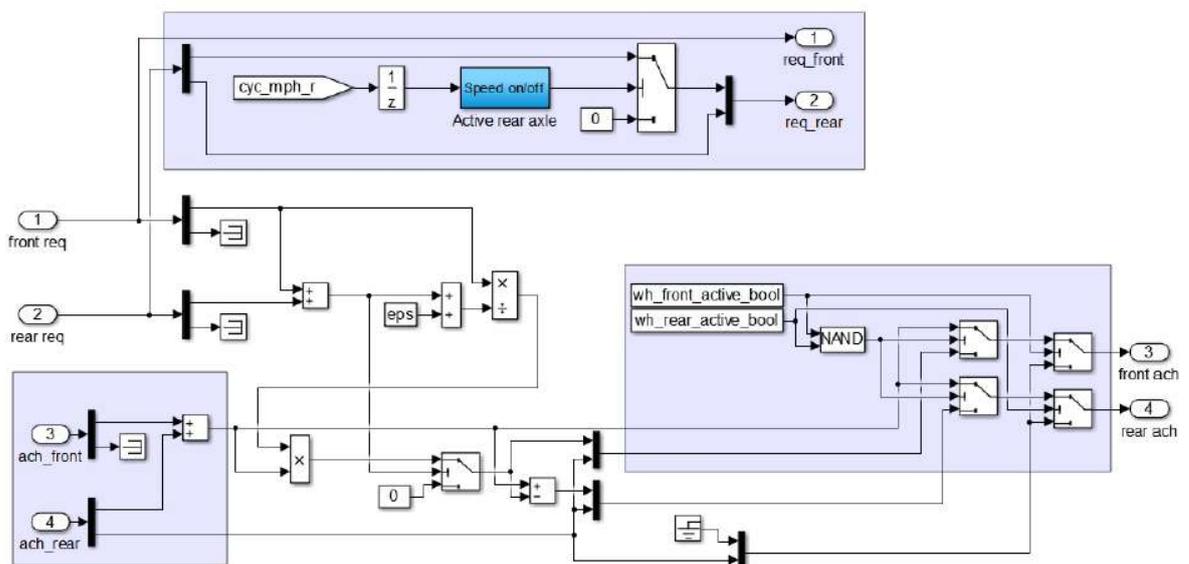
gerar demanda aos dois eixos de tração do veículo foi modificado esse bloco, sendo adicionada uma entrada e uma saída referentes a cada um dos dois diferenciais. Na Figura 34 pode ser observado destacado em azul o bloco que representa as rodas e eixos do veículo, já na Figura 35 é mostrado o diagrama interno deste bloco.

Figura 34 – Bloco que representa as rodas e os eixos



Fonte: Software ADVISOR..

Figura 35 – Diagrama de seleção do eixo de tração



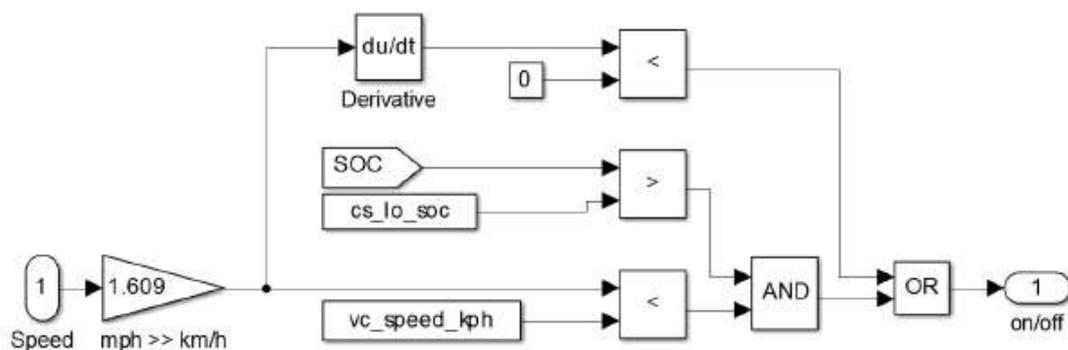
Fonte: Software ADVISOR..

Para poder realizar a separação das demandas de torque e velocidade em cada eixo de tração do veículo, foram inseridas e ou modificadas as áreas destacadas em azul, observado na Figura 35. As entradas 1 e 2 recebem a velocidade e torque disponível, as saídas 1 e 2 determinam a velocidade e o torque requerido na saída do diferencial de tração.

A lógica de controle de ativação de demanda de torque para o eixo traseiro está contida no bloco de cor azul. Sempre que a velocidade do veículo estiver abaixo de uma velocidade pré-determinada e o estado de carga da bateria estiver acima do limite pré-definido, a demanda de torque para o sistema de tração elétrica é ativada. Para recuperar energia por meio da frenagem regenerativa, sempre que o veículo estiver desacelerando, independente da velocidade, a demanda de torque ao eixo traseiro é ativada.

O diagrama interno do bloco de controle e ativação do sistema de tração elétrica está representado na Figura 36, o qual foi implementado para realizar a ativação de demanda de torque no eixo da tração elétrica.

Figura 36 – Diagrama de blocos do bloco de controle de ativação do sistema de tração elétrica

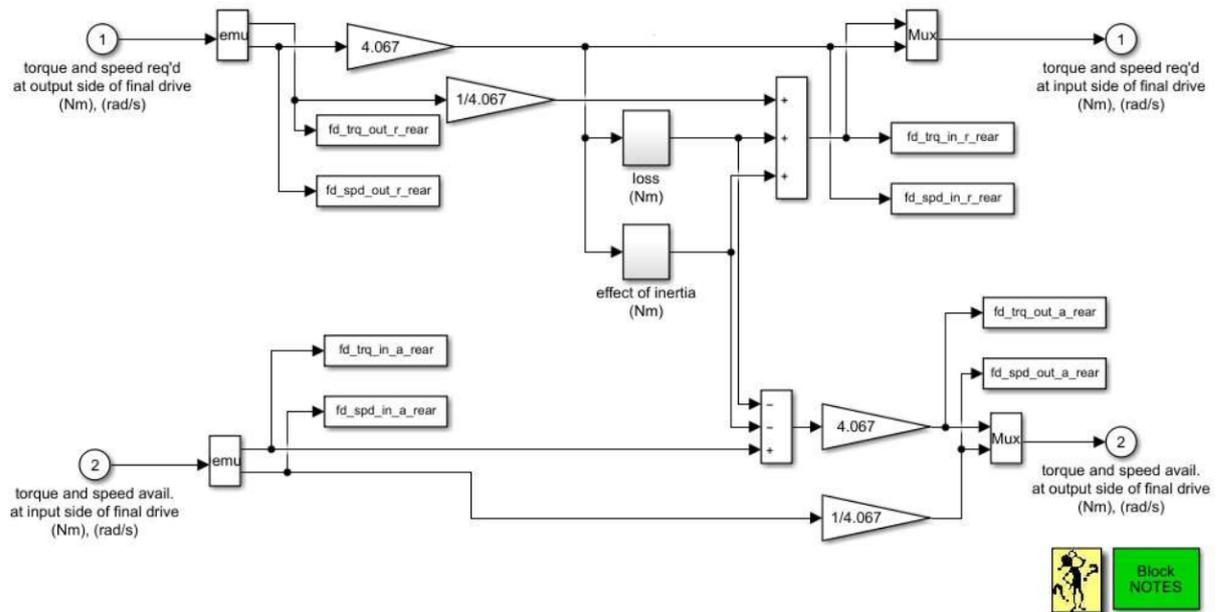


Fonte: **Software ADVISOR..**

Como já mencionado anteriormente e apresentado na Figura 33, os blocos de diferencial e caixa de marcha do sistema de tração foram duplicados para realizar o desacoplamento dos eixos de tração do veículo. Foi utilizado o mesmo bloco do diferencial para o sistema de tração elétrica, com a mesma relação de redução do veículo convencional, aproximadamente quatro vezes. A função deste bloco é aumentar o torque e reduzir a velocidade, e ainda calcular as perdas deste conjunto mecânico. O diagrama do bloco do diferencial mecânico é apresentado na Figura 37.

Para se ter apenas uma relação de redução ao invés de cinco, foi modificado o

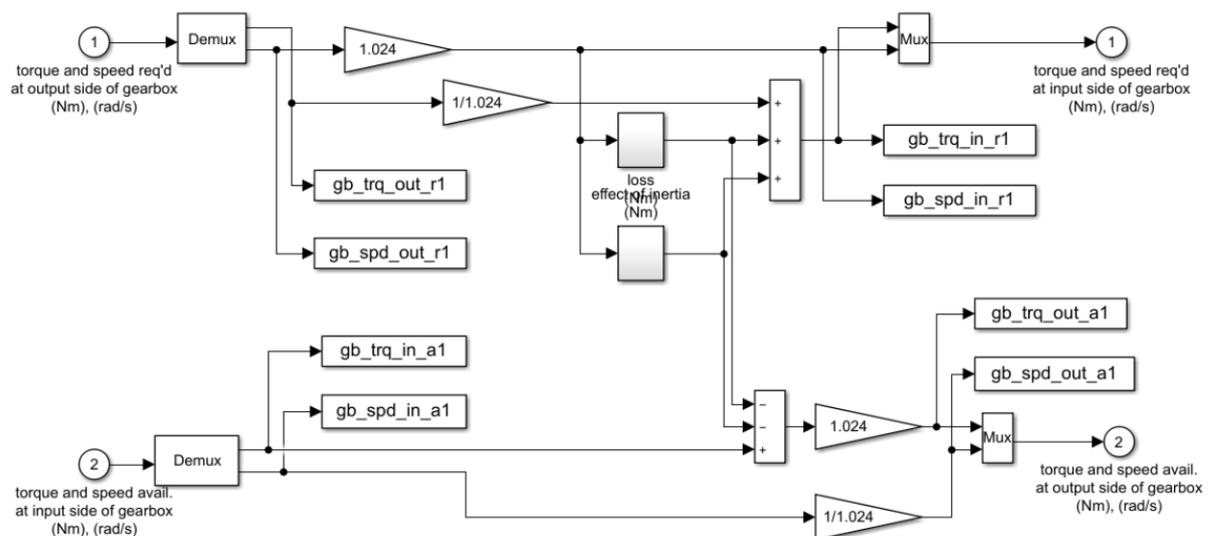
Figura 37 – Diagrama de blocos do bloco do diferencial



Fonte: **Software ADVISOR..**

diagrama de blocos da caixa de marchas do sistema de tração elétrica. O conjunto da transmissão deste sistema de tração possui uma redução de seis vezes, como o torque é inversamente proporcional à velocidade, e esta foi reduzida em aproximadamente seis vezes com as modificações realizadas, o torque por consequência é aumentado aproximadamente seis vezes. É apresentado na Figura 38 o diagrama de blocos da caixa de marcha do sistema de transmissão do conjunto de tração elétrica do veículo.

Figura 38 – Diagrama de blocos da caixa de redução do sistema de tração elétrica

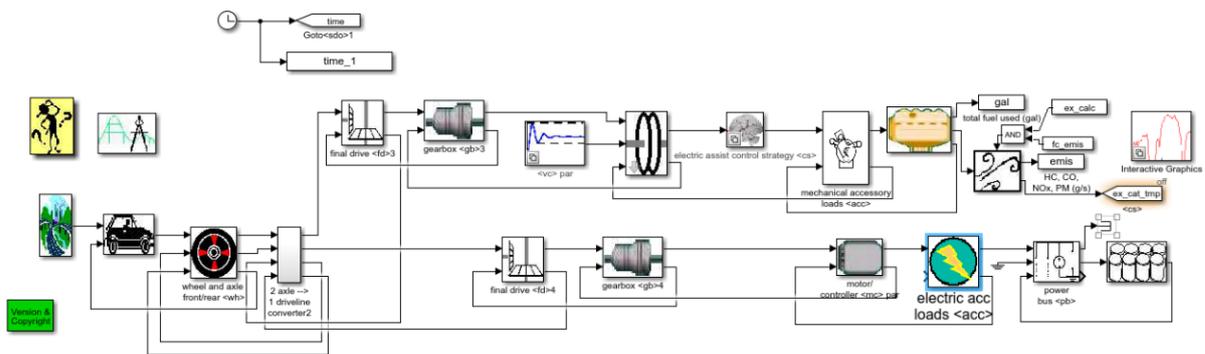


Fonte: **Software ADVISOR..**

Também é necessário realizar algumas modificações no bloco de gerencia-

mento da parte elétrica como o objetivo de ajustes na parte de frenagem regenerativa, responsável pela regeneração de energia para o sistema de armazenamento e por consequência ampliação da autonomia do veículo. Na Figura 39 o bloco *Electric acc loads* encontra-se destacado, sendo as modificações realizadas no interior deste bloco.

Figura 39 – Diagrama de blocos com destaque para Bloco de Controle parte elétrica



Fonte: **Software ADVISOR..**

No interior do bloco *Electric acc loads*, encontra-se o bloco *Backward Model*, conforme apresentado na Figura 40, sendo especificamente no interior deste bloco efetuadas as mudanças para ajuste da regeneração de energia.

No interior do bloco *Backward Model* foi inserido o bloco Ajuste Carregamento destacado na cor vermelha apresentado na Figura 41.

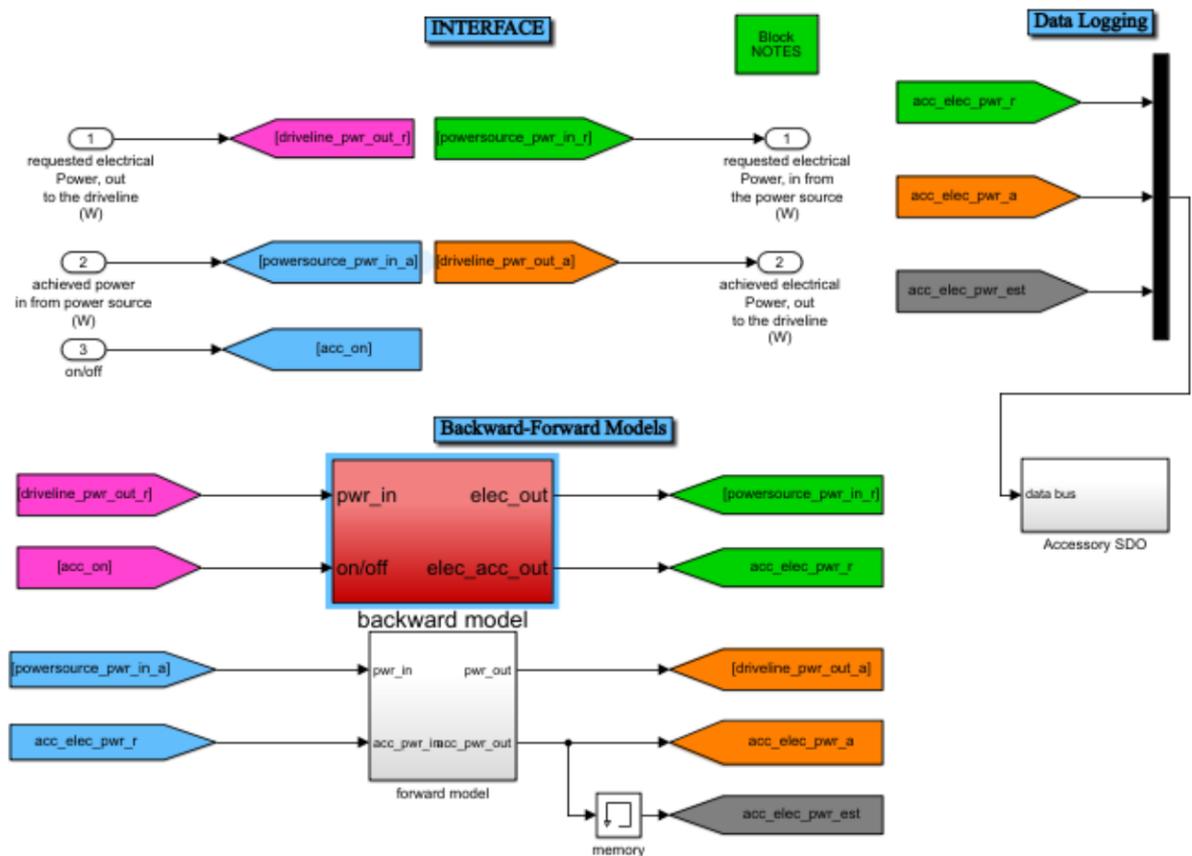
Na Figura 42 é apresentado o ajuste desenvolvido, quando as condições de controle são satisfeitas o sinal de entrada é multiplicado por um ganho, o qual será detalhado no Capítulo 4. Se as condições de controle não forem satisfeitas o sinal passa pelo bloco sem sofrer ajuste.

O controle para o bloco de ajuste do sinal é ativado sempre que o estado de carga dos armazenadores de energia encontram-se abaixo de um valor pré-determinado, cs_hi_soc , conforme apresentado na Figura 43. Esta variável pode ser ajustada quando estão sendo inseridos os parâmetros para a simulação, o valor pré-fixado pelo programa é 0,7.

3.3 PARÂMETROS

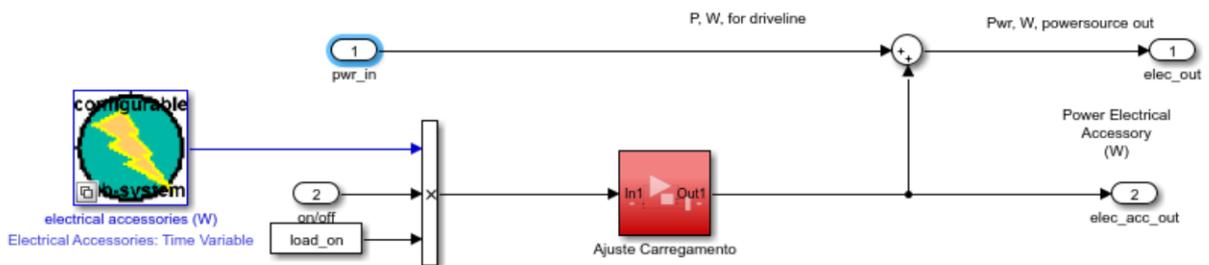
Para análise do trabalho será considerado um veículo nacional compacto, cujo os parâmetros estão apresentados na Tabela 5. Estes dados foram obtidos da biblioteca do *software ADVISOR* do veículo "VEH_SMCAR".

Figura 40 – Diagrama de blocos com destaque para bloco *Backward Model*



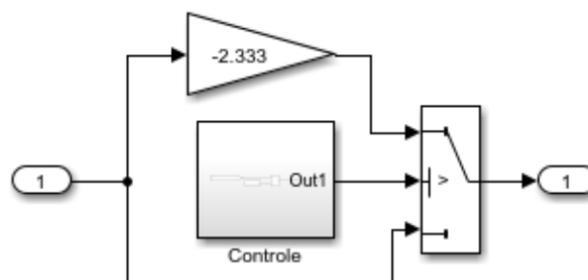
Fonte: *Software* ADVISOR..

Figura 41 – Diagrama de blocos interno do bloco *Backward Model*



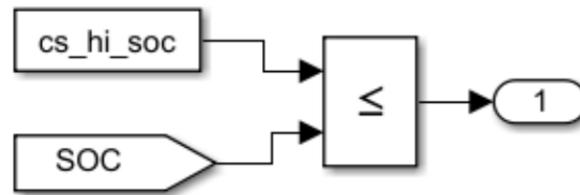
Fonte: *Software* ADVISOR..

Figura 42 – Diagrama de blocos do bloco de Ajuste da recarga



Fonte: *Software* ADVISOR..

Figura 43 – Diagrama de blocos do controle da recarga



Fonte: *Software ADVISOR..*

Utilizou-se o *clock* para sincronizar o tempo da simulação com o tempo do ciclo de condução, onde utilizaram-se 1372 pontos (segundos). Foi utilizado passo de integração fixo de 1 ms; o integrador utilizado foi *ode3 (Bogacki-Shampine)*.

Tabela 5 – Parâmetros de um veículo nacional compacto

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|---|-------|---------|
| Comprimento | 3692 | mm |
| Entre-eixos | 2361 | mm |
| Peso | 825 | Kg |
| Distribuição de peso | 60/40 | % |
| Largura | 1548 | mm |
| Altura | 1445 | mm |
| Distância CG-eixo frontal | 1192 | mm |
| Distância CG-eixo traseiro | 1292 | mm |
| Distância CG-altura | 690 | mm |
| Raio do pneu | 0,33 | m |
| Área frontal | 1,81 | m |
| Coeficiente de arraste aerodinâmico | 0,36 | – |
| Coeficiente de resistência ao rolamento | 0,009 | – |

Fonte: *Software ADVISOR..*

O software ADVISOR possui em sua biblioteca um veículo com parâmetros semelhantes ao apresentado em Tabela 5, veículo este denominado "*Small Car*". Ainda, o *software* ADVISOR utiliza a aceleração da gravidade com valor de 9,81 m/s², densidade do ar 1,2 kg/m³, informações necessárias para a simulação.

Também são necessárias algumas especificações, que são parâmetros definidos pelo projeto, sendo elas: autonomia, percurso e velocidade, dados estes apresentados em Tabela 6. A velocidade foi obtida do ciclo de condução urbano brasileiro NBR6601, que vem a ser o mesmo que o ciclo CYC_UDDS. Considerando que o estudo é para um veículo de uso urbano, e esse pode ser utilizado com frações de tempo de uso o tempo foi considerado indeterminado.

Tabela 6 – Especificações Técnicas

| Parâmetro | Valor | Unidade |
|---------------------------------|---------------|---------|
| Autonomia | ~2 | [h] |
| - Percurso | 60 | [km] |
| - Tempo | Indeterminado | [h] |
| Velocidade máxima | | |
| - 100% de carga em acive de 20% | 91,2 | [km/h] |

Fonte: Autoria própria.

3.4 CICLO DE CONDUÇÃO

Um ciclo de condução caracteriza o modo como o veículo é guiado em um percurso, representando também as características da estrada. Quem define o percurso, o que acaba gerando uma série de diferentes tipos de situações que envolvem pavimentação, topologia e carga é o motorista, sendo responsável pelo modo que o veículo é conduzido. Foram criados os ciclos padrão de condução pelo fato de cada motorista possuir comportamento diferente em um mesmo trajeto (CORREA et al., 2013).

Para definir os ciclos de condução padrão, são utilizados veículos devidamente instrumentados e gravado o percurso em situações reais de uso. Após coletar os dados, estes são avaliados para se obter os níveis de solicitação, desta maneira são criados os ciclos característicos em função da aceleração e velocidade do veículo (CORREA et al., 2013).

Estes ciclos padrão são projetados de forma a reproduzir as condições urbanas e extra urbanas de condução de veículo, reproduzindo medidas de velocidades em estradas reais (CORREA et al., 2013).

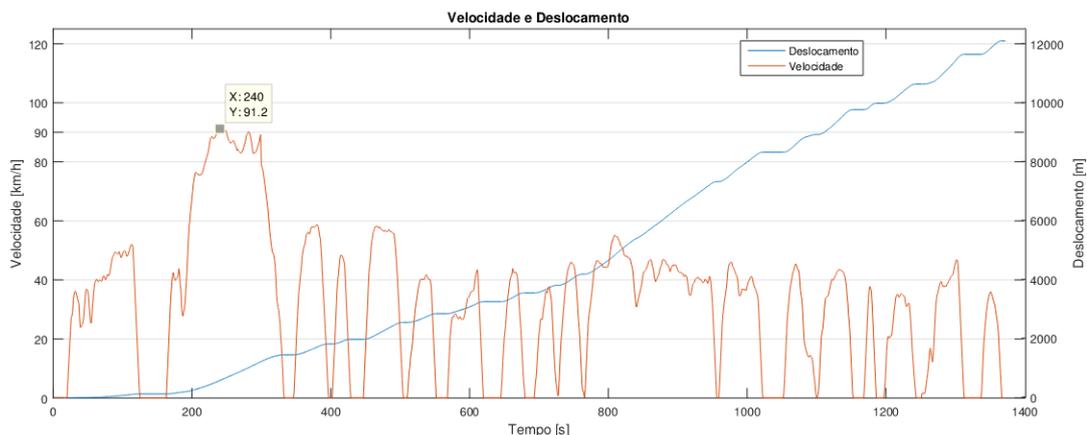
Algumas curvas de ciclo de condução foram elaboradas para descrever os perfis de velocidade em certas aplicações, sendo usadas para testar o desempenho do veículo nessas situações. Originalmente esses ciclos de condução foram elaborados para avaliar os parâmetros de consumo de combustível e emissão de poluentes dos veículos com MCI. Para os esses ciclos permitem avaliar o desempenho com relação à demanda de potência e ao consumo de energia (TANAKA, 2013).

Um ciclo de condução é uma padronização referida por meio de uma tabela velocidade-tempo. O percurso a ser representado é fracionado em intervalos de tempo, em geral segundos, e a aceleração é considerada constante em um período de tempo. Dessa forma, a velocidade ao longo do intervalo de tempo é uma função linear do tempo,

assim, como a velocidade e a aceleração são conhecidas em determinado intervalo de tempo e é possível determinar a potência requerida em função do tempo. Integrando-se a potência requerida no tempo de duração do ciclo obtêm-se a energia necessária para o ciclo em questão (TANAKA, 2013).

Para realizar a simulação foi utilizado o ciclo CYC_UDDS, sendo o mesmo NBR6601. Este ciclo representa a condução de um veículo em um ambiente urbano. No Gráfico 1 podem ser observadas a variação da velocidade e a distância total percorrida. Conforme já apresentado a velocidade máxima é de 91,2 km/h, sendo que a distância total percorrida em um ciclo de condução perfaz 12 km. Sendo assim, conforme definido na Tabela 6 o percurso desejado é de 60 km, então serão necessários 5 ciclos CYC_UDDS para satisfazer as especificações técnicas.

Gráfico 1 – Ciclo de Condução CYC_UDDS e Deslocamento.



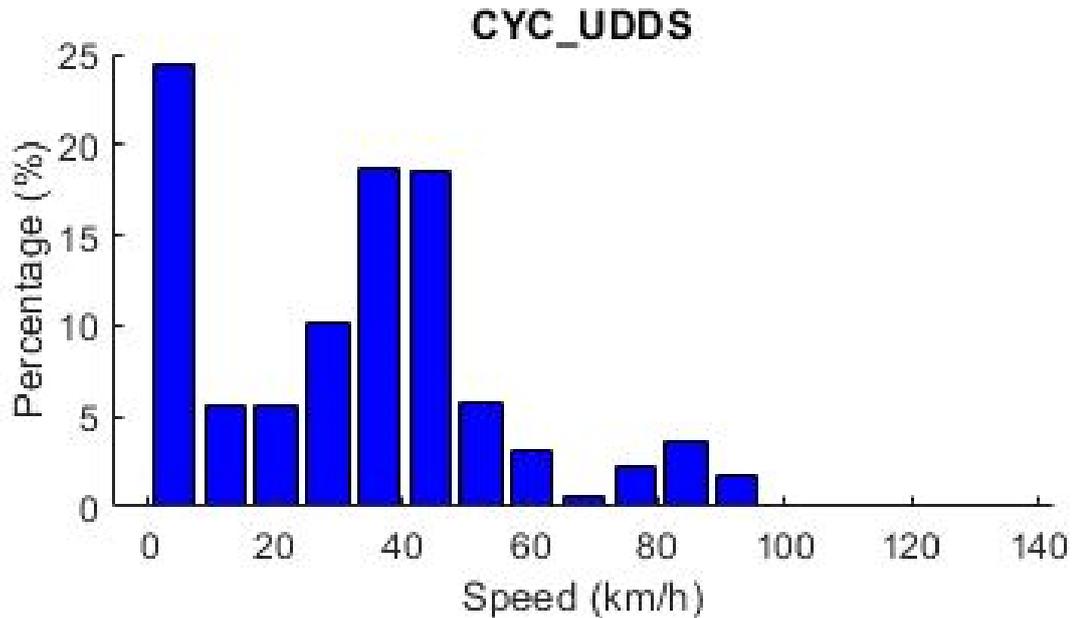
Fonte: Adaptado de Software ADVISOR..

Ainda é possível observar pelo Gráfico 2 o percentual de exposição em cada velocidade em que o veículo é submetido durante o ciclo.

3.5 SISTEMAS DE TRAÇÃO

Com o objetivo de gerar dados para comparação, neste trabalho foram realizadas simulações, utilizando o auxílio da ferramenta ADVISOR, das seguintes configurações de veículos: veículo convencional equipado com MCI, VEH configuração paralela com dois níveis de hibridização, VEH configuração série e VE *plug-in*. Em todos os casos analisados foi buscado manter a mesma potência para o sistema de tração. Nas próximas subseções serão apresentados os veículos com as diversas configurações

Gráfico 2 – Percentual de exposição de velocidade do CYC_UDDS.



Fonte: *Software ADVISOR..*

utilizadas.

3.5.1 Definições

Para realizar as simulações é necessário definir alguns valores, como potência dos motores, tipo e potência das baterias, entre outros. Na Tabela 7 são apresentados os valores definidos para serem utilizados na simulação das configurações paralela e paralela de eixos separados.

Tabela 7 – Definição dos componentes

| | |
|---|------------|
| Potência MCI | 43 kW |
| Potência ME | 45 KW |
| Baterias de Íon-Lítio | 25 módulos |
| Eficiência MCI | 34% |
| Eficiência ME | 92% |
| Eficiência Transmissão | 94% |
| SOC (Estado de Carga Inicial) | 70% |
| cs_lo_soc (Estado Mínimo de Carga) | 40% |
| vc_speed_kph (Velocidade Máxima de Operação com ME) | 60 km/h |

Fonte: **Autoria própria.**

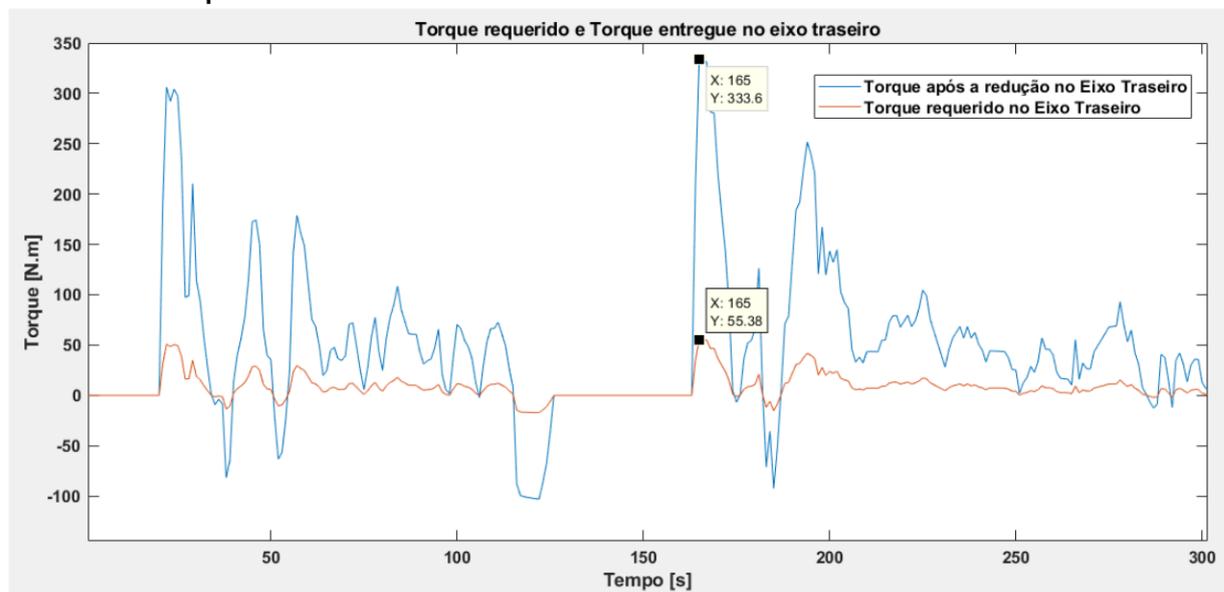
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos após as modificações no sistema conforme apresentado no Capítulo 3. Os resultados obtidos com as modificações no diagrama de blocos do modelo de VEH paralelo *default* disponível na biblioteca do ADVISOR, para realizar a separação dos sistemas de tração do veículo apresentado na Seção 3.2, proposta deste trabalho, serão apresentados neste capítulo.

Para realizar as simulações foram definidos a potência e eficiência do MCI e ME para os veículos, bem como a quantidade de células e estado de carga (SOC) de bateria, mínimo estado de carga (*cs_lo_soc*) e velocidade máxima de operação (*vc_spped_kph*) com o ME, conforme apresentado no Seção 3.5.1.

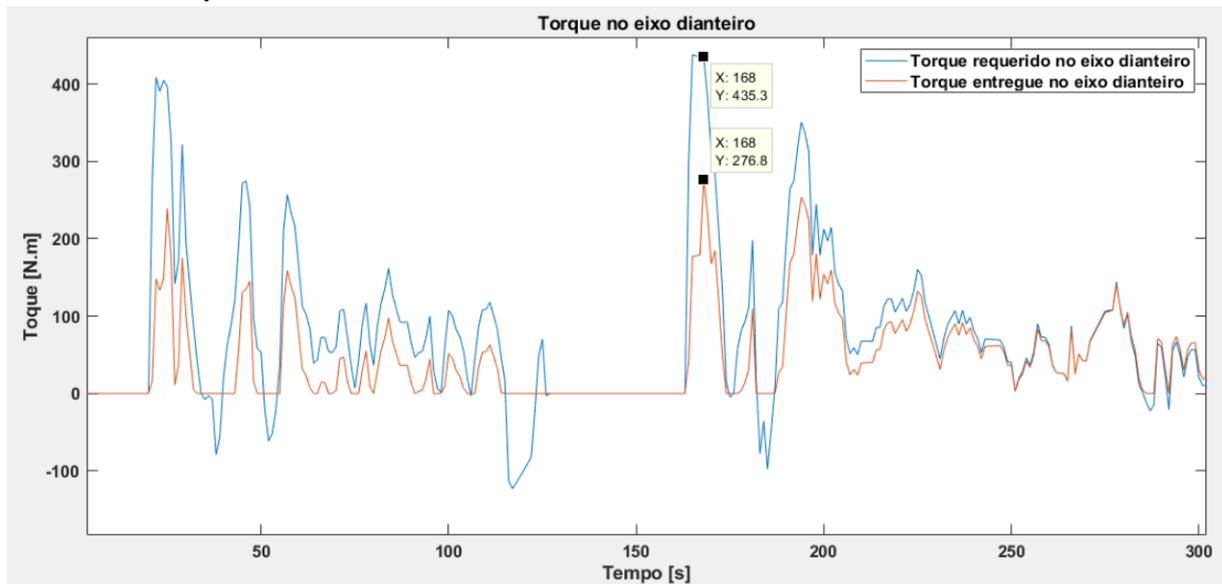
Realizadas as simulações foram obtidos os gráficos de torque nos eixos traseiro e dianteiro, os quais são apresentados nos Gráfico 3 e Gráfico 4, respectivamente, onde no eixo traseiro o torque de saída apresentou ganho de aproximadamente seis vezes com as reduções aplicadas. Devido às modificações e retirada do bloco de acoplamento mecânico a amplitude para o torque negativo apresentado foi muito baixo não favorecendo a regeneração de energia durante a frenagem regenerativa, sendo necessário ajustes. Ainda, para o eixo dianteiro foram mantidas as relações de ganho, sendo a linha em azul o torque requerido e a linha em vermelho o torque entregue ao sistema.

Gráfico 3 – Torque no eixo traseiro.



Fonte: *Software ADVISOR..*

Gráfico 4 – Torque no eixo dianteiro.



Fonte: **Software ADVISOR..**

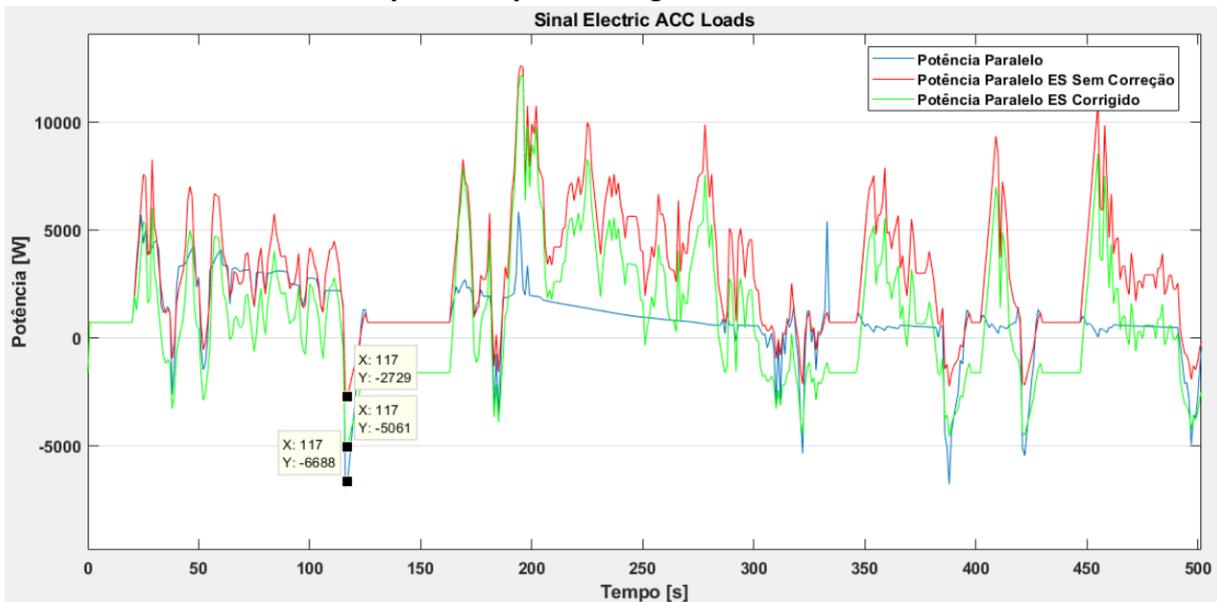
Em consequência das mudanças realizadas nos diagramas de blocos para aplicar a separação do sistema de propulsão nos eixos do veículo, o mesmo deixou de atualizar algumas variáveis utilizadas nas equações do diagrama de blocos responsável pela regeneração de energia por meio da frenagem. Sendo então procedidos os ajustes apresentados na Seção 3.2

Na sequência é apresentado no Gráfico 5 os sinais obtidos no bloco responsável pelos cálculos para realização da recarga por meio da frenagem regenerativa (*Electric ACC Loads*). Onde, a linha azul é o sinal obtido neste bloco da configuração paralela convencional do *software* antes das modificações, a linha em vermelho é o sinal obtido no mesmo bloco após realizadas as modificações para realizar a separação do torque entre os eixos, e a linha em verde é o sinal obtido no mesmo bloco após aplicados os ajustes para correção do sinal para que o veículo possua a capacidade de regenerar energia da frenagem.

Considerando que foi utilizado o mesmo ciclo e a mesma configuração para os veículos com configuração paralela e paralela com eixos separados, os valores, principalmente o torque negativo no eixo traseiro, devem ser valores próximos, pois no período de desaceleração o eixo traseiro está sempre ativo. Por esse motivo a medida aplicada para a correção do sinal no bloco *Electric ACC Loads* se fez necessária.

Ainda comparando os resultados da configuração paralela de eixos separados com os resultados da configuração paralela do *software ADVISOR*, são apresentados

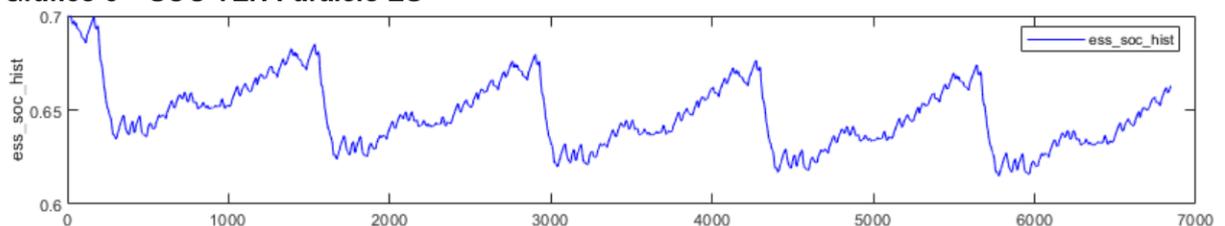
Gráfico 5 – Sinal no Bloco Responsável pela Recarga.



Fonte: *Software ADVISOR..*

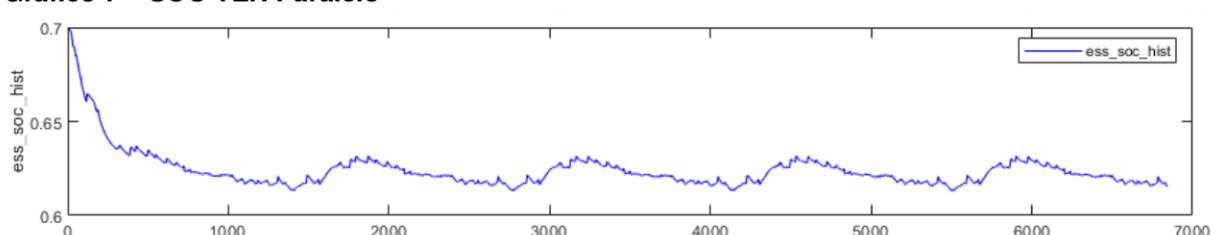
nos Gráfico 6 e Gráfico 7 o estado de carga da bateria para as configurações paralela de eixos separados e paralela, respectivamente. Pode ser observado que ocorre a regeneração da carga das baterias para ambos os casos, a cada repetição de ciclo ocorre uma amplitude maior de regeneração do estado de carga da bateria na configuração paralela de eixos separados, em um ciclo com mais desacelerações o veículo pode ampliar o alcance em relação à configuração em paralelo.

Gráfico 6 – SOC VEH Paralelo ES



Fonte: *Software ADVISOR..*

Gráfico 7 – SOC VEH Paralelo

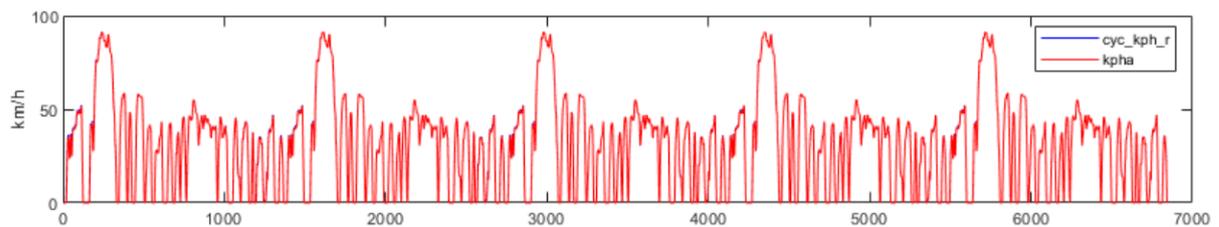


Fonte: *Software ADVISOR..*

Nos Gráfico 8 e Gráfico 9 são apresentados, respectivamente, os gráficos para

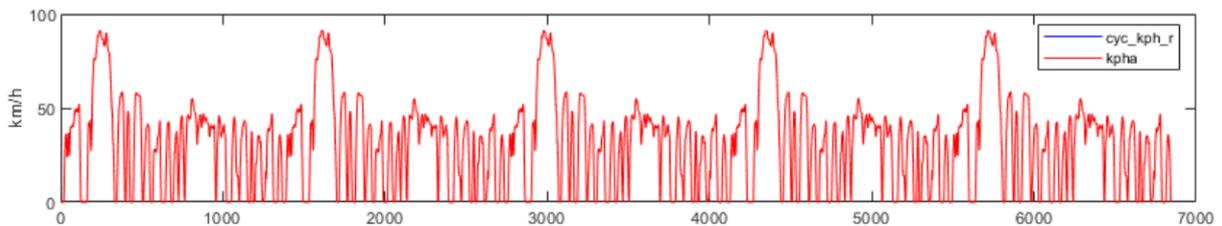
os VEH's Paralelo ES e Paralelo, gráficos estes fornecidos pelo *software* ADVISOR após a simulação, onde a linha em azul representa o ciclo de condução a ser seguido, e a linha em vermelho o ciclo percorrido pelo veículo, quando o gráfico apresenta apenas a linha em vermelho significa que o veículo simulado atendeu o ciclo proposto.

Gráfico 8 – Gráfico ciclo VEH Paralelo ES



Fonte: *Software* ADVISOR..

Gráfico 9 – Gráfico ciclo VEH Paralelo



Fonte: *Software* ADVISOR..

Continuando o comparativo de resultados, são apresentados os resultados para a simulação das configurações paralela de eixos separados e paralela, respectivamente. Os resultados obtidos foram convertidos na Tabela 8, na qual pode ser observado que o veículo com a configuração paralela de eixos separados apresentou melhor rendimento, consumindo menos combustível e também apresentou menor emissão de poluentes.

Tabela 8 – Consumo e Emissões das Simulações.

| Veículo | Combustível | | Emissões | | | Trajeto percorrido |
|-------------------|-------------|---------|----------|-------|-------|--------------------|
| | Rendimento | Consumo | HC | CO | NOx | |
| VEH Paralelo - ES | 25,64 | 3,9 | 0,294 | 0,253 | 0,051 | 59,8 |
| VEH Paralelo | 17,86 | 5,6 | 0,302 | 0,294 | 0,094 | 59,9 |

Fonte: **Autoria própria.**

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Diante das regulamentações dos países para a redução de emissão de poluentes, e melhoria de eficiência dos sistemas propulsão de veículos automotores, e ainda de programas de incentivo à melhoria de eficiência energética, como por exemplo o programa brasileiro ROTA 2030, os estudos envolvendo VE's e VEH's estão bastante difundidos.

Em países do continente europeu, a eletrificação de veículos já é uma realidade presente, principalmente em meios urbanos. Outro ponto de destaque se dá para fabricantes de veículos pesados estarem a passos largos investindo em desenvolvimento de veículos comerciais híbridos e elétricos.

Para o presente trabalho foi proposto desenvolver uma *tool box* para o *software* ADVISOR, com a arquitetura paralela de eixos separados.

Considerando que para o desenvolvimento do presente trabalho não foram construídos todos os diagramas de bloco, e sim utilizado o diagrama de blocos da arquitetura *PARALLEL_defaults_in*, este já existente na base de dados do *software* ADVISOR, onde foram realizadas modificações para separar o torque entre os eixos de tração. Porém, para poder realizar essas alterações é necessário conhecer as variáveis (blocos) que devem ou podem ser modificadas.

Após realizar as modificações para separar os sistemas de tração, foi identificado que algumas variáveis relacionadas com o sistema da frenagem regenerativa não guardavam os dados para resolução das equações, com isso foi necessário especificar as variáveis e localizar os locais onde estas eram tratadas. Após precisar as mesmas foram localizados os blocos que estas operavam e assim realizar correção destes dados diretamente no bloco responsável por estas equações.

Conforme os resultados apresentados no Capítulo 4, restou comprovado que o objetivo de criar uma *tool box* para o *software* ADVISOR com a configuração de um VEH paralelo de eixos separados foi alcançado.

Outro ponto a destacar é a melhoria de eficiência e relacionado ao fato do veículo possuir o sistema de tração contemplando os dois eixos, desta maneira é possível otimizar o fornecimento de energia para a propulsão veicular melhorando o desempenho do veículo.

Para que essas tecnologias se tornem mais acessíveis e presentes em nosso

cotidiano, mais estudos se fazem necessários. Com a difusão dessa tecnologia, os fabricantes de veículos poderão no futuro, implementar em seu portfólio de produtos, veículos elétricos de baixo custo, se tornando mais acessíveis para a população em geral.

Com base nos resultados obtidos por meio das simulações, para trabalhos futuros é sugerido:

- Elaborar um sistema de gerenciamento mais refinado das potências envolvidas;
- Utilizar um sistema de armazenamento híbrido, utilizando supercapacitores e baterias, para melhor aproveitamento da energia oriunda da frenagem regenerativa;
- Elaborar a viabilidade de um estudo econômico para instituir a hibridização de um veículo convencional com a arquitetura paralela de eixos separados;
- Avaliar as melhores maneiras de utilizar o MCI.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, C. D.; ANDERSON, J. **Electric and hybrid cars: A history**. [S.l.]: McFarland, 2010.

ANSELMA, P. G. et al. Comparing parallel hybrid electric vehicle powertrains for real-world driving. In: IEEE. 2019 AEIT International conference of electrical and electronic technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE). [S.l.: s.n.], 2019. P. 1–6.

BARAN, R. **A introdução de veículos elétricos no Brasil: Avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BARASSA, E. et al. Trajetória tecnológica do veículo elétrico: atores, políticas e esforços tecnológicos no Brasil. Campinas, SP, 2015.

BENTO, J. P. M. Análise da viabilidade de adaptação de motores elétricos nos cubos de rodas traseiros de veículos de passeio, 2015.

BORBA, B. Big Push para a Mobilidade Sustentável Cenários para acelerar a penetração de veículos elétricos leves no Brasil. CEPAL, 2020.

BOTTURA, C. P.; BARRETO, G. **Veículos elétricos**. [S.l.]: Ed. da UNICAMP, 1989.

BRANDÃO, P. V. R.; ALBUQUERQUE, É. L. de; FIALHO, R. L. L. Estudo comparativo entre as metodologias para realização de inventários de emissão de gases poluentes por fontes automotoras: CETESB x Ministério do Meio Ambiente. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 25544–25554, 2020.

BURKE, A.; ZHAO, H. **Energy Saving and Cost Projections for Advanced Hybrid, Battery Electric, and Fuel Cell Vehicles in 2015-2030**. [S.l.], 2012.

CARVALHO, C. H. R. de. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. [S.l.], 2011.

CASTRO, B. H. R. d.; FERREIRA, T. T. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. **BNDES Setorial**, n. 32, set. 2010, p. 267-310, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2010.

CHAN, C. C. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 95, n. 4, p. 704–718, 2007.

CHAN, C. C. The Rise & Fall of Electric Vehicles in 1828–1930: Lessons Learned [Scanning Our Past]. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 101, n. 1, p. 206–212, 2013.

CHEN, P.-T. et al. Development of transmission systems for parallel hybrid electric vehicles. **Applied Sciences**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 8, p. 1538, 2019.

CORREA, F. C. et al. Desenvolvimento e análise de estratégias de gerenciamento de potência em veículo elétrico híbrido de configuração paralela. Campinas, SP, 2013.

COSTA, W. d. **Metodologia para conversão de veículos equipados com motores a combustão interna para tração elétrica: aplicação de motor síncrono de ímã permanente com fluxo magnético radial a um furgão**. 2009. Tese (Doutorado) – Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro.

COWAN, R.; HULTÉN, S. Escaping lock-in: the case of the electric vehicle. **Technological forecasting and social change**, Elsevier, v. 53, n. 1, p. 61–79, 1996.

DIAS, J. E. A. Modelagem longitudinal e controle de velocidade de um carro autônomo. **Universidade Federal de Minas Gerais**, 2013.

ECKERT, J. J. et al. Desenvolvimento de bancada dinamométrica para validação da influência da estratégia de troca de marchas na dinâmica veicular longitudinal. [sn], 2017.

EHSANI, M.; GAO, Y.; EMADI, A. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design**. [S.l.]: CRC press, 2009.

EHSANI, M.; RAHMAN, K. M.; TOLIYAT, H. A. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. **IEEE Transactions on industrial electronics**, IEEE, v. 44, n. 1, p. 19–27, 1997.

FAROOQUI, U.; AHMAD, A.; HAMID, N. Challenges and potential advantages of membranes in lithium air batteries: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 77, p. 1114–1129, 2017.

FERREIRA, A. A. et al. Sistema supervisor de gestão de múltiplas fontes de suprimento para aplicações em veículos elétricos. Campinas, SP, 2007.

FERREIRA, T. J. P. et al. Sistema de gerenciamento de energia para controle de carga/descarga entre baterias de lítio e ultracapacitores, envolvendo sistema de tração elétrica com frenagem regenerativa. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014.

FRANCISCO, B. A. B. et al. Avaliação das condições de operação e da influência de eletrólito em baterias lítio-oxigênio. [sn], 2020.

FRANCO, D. A. P. J. et al. Incentivos fiscais para comercialização de veículos no Brasil Programa ROTA 2030. **CAFI-Contabilidade, Atuária, Finanças & Informação**, v. 3, n. 2, p. 149–164, 2020.

FREITAS, D. Z. **Análise de Eficiência e Controle de um Sistema Integrado Roda-Motor Elétrico**. 2015. Tese (Doutorado) – PUC-Rio.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. [S.l.], 1992.

GOOGLE. **Imagens do Google**. [S.l.: s.n.], mai. 2017. Disponível em: <https://www.google.com/imghp?hl=pt-BR>.

GUJARATHI, P.; SHAH, V.; LOKHANDE, M. Performance analysis of converted parallel plug-in hybrid electric vehicle. In: IEEE. 2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC). [S.l.: s.n.], 2017. P. 191–196.

HOYER, K. G. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. **Utilities Policy**, Elsevier, v. 16, n. 2, p. 63–71, 2008.

JUNIOR, E. C.; DE ABREU, J. S. FRENAGEM REGENERATIVA: UM ESTUDO SOBRE SEU FUNCIONAMENTO E DIFERENTES APLICAÇÕES, 2019.

KAPADIA, J. et al. Powersplit or parallel-selecting the right hybrid architecture. **SAE International Journal of Alternative Powertrains**, JSTOR, v. 6, n. 1, p. 68–76, 2017.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. **Electric vehicle technology explained**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.

LOPES, J. **Estratégias de gerenciamento de potência em ônibus de transporte urbano elétrico híbrido série**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

LOPES, J. et al. Metodologias de dimensionamento e de gestão de fontes de energia para veículos elétricos. [sn], 2012.

MACHADO, F. F. BRASIL, AUTOMÓVEL ELÉTRICO NO, 2015.

MATTOS, L. B. R. de. **A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa-o caso do município do rio de janeiro**. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MORAES, H. B.; BARASSA, E.; CONSONI, F. L. Conhecimento científico e tecnológico para o veículo elétrico no Brasil: uma análise a partir das instituições de ciência e tecnologia e seus grupos de pesquisa. **Desafio Online**, v. 4, n. 2, p. 100–115, 2016.

OLIVEIRA, T. C. d. Estudo da tecnologia empregada em veículos elétricos com autonomia estendida: comparativo experimental com veículos híbridos, 2018.

PEREZ-PINAL, F. J. et al. Step by step design procedure of an Independent-Wheeled Small EV applying EVLS. In: IEEE. IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on. [S.l.: s.n.], 2006. P. 1176–1181.

PRATHIBHA, P.; SAMUEL, E. R.; UNNIKRISHNAN, A. Parameter study of electric vehicle (EV), hybrid EV and fuel cell EV using advanced vehicle simulator (ADVISOR) for different driving cycles. In: GREEN Buildings and Sustainable Engineering. [S.l.]: Springer, 2020. P. 491–504.

REVOREDO, T. C. Modelagem e Gerenciamento de Potência de um Veículo Elétrico Híbrido de Célula a combustível. **Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Tese de Mestrado**, 2007.

RIO GRANDE DO SUL, P. do; ALEGRE, R. Fernando Lang da Silveira, 2007.

RODRIGUES, J. A. C. **Armazenamento de energia e uso de supercondensadores em sistema de mobilidade elétrica**. 2013. Tese (Doutorado) – Instituto Politécnico de Viseu. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.

SALEKI, A.; REZAZADE, S.; CHANGIZIAN, M. Analysis and simulation of hybrid electric vehicles for sedan vehicle. In: IEEE. 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). [S.l.: s.n.], 2017. P. 1412–1416.

SANTOS, E. P. dos; ZUBEN, F. J. von. Efficient Second-Order Learning Algorithms for Discrete-Time Recurrent Neural Networks. In: **Recurrent Neural Networks: Design and Applications**. Edição: L. R. Medsker e L. C. Jain. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2000. v. 13 cap. 3, p. 47–75. (International Series on Computational Intelligence). ISBN 9780849371813.

SANTOS, M. M. D. **Veículos elétricos e Híbridos: Fundamentos, Características e Aplicações**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2020.

SILVA, R.; PIRES, I. Aspectos tecnológicos e oportunidades para os veículos elétricos e híbridos no mercado nacional. **12th Salão Latino Americano de Veículos Elétricos, São Paulo-SP**, p. 1–20, 2016.

SILVA, R. A. Avaliação da hibridização de um veículo nacional compacto utilizando arquitetura paralela de eixos separados. Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

SNOW, R. **FORD**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2017.

SOUZA, C. C. d. N. et al. Análise de sistema eletroquímico chumbo-ácido via modelagem entrópica. Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

SUN, F. et al. An integrated control strategy for the composite braking system of an electric vehicle with independently driven axles. **Vehicle System Dynamics**, Taylor & Francis, v. 54, n. 8, p. 1031–1052, 2016.

TANAKA, C. N. **Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

TRENDINGVIEW. **Evolução do Preço do Barril do Petróleo**. [S.l.: s.n.], dezembro 2021. [acionista.com.br](https://br.tradingview.com/chart/?symbol=FX%3AUKOIL). Disponível em:
<https://br.tradingview.com/chart/?symbol=FX%3AUKOIL>.

WANG, E.; GUO, D.; YANG, F. System design and energetic characterization of a four-wheel-driven series-parallel hybrid electric powertrain for heavy-duty applications. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 106, p. 1264–1275, 2015.

XUE, X.; CHENG, K.; CHEUNG, N. Selection of electric motor drives for electric vehicles. In: IEEE. POWER Engineering Conference, 2008. AUPEC'08. Australasian Universities. [S.l.: s.n.], 2008. P. 1–6.

YANG, Y. et al. Comparison of power-split and parallel hybrid powertrain architectures with a single electric machine: Dynamic programming approach. **Applied energy**, Elsevier, v. 168, p. 683–690, 2016.

ZERAOULIA, M.; BENBOUZID, M. E. H.; DIALLO, D. Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study. **IEEE Transactions on Vehicular technology**, IEEE, v. 55, n. 6, p. 1756–1764, 2006.

ZHOU, X.; QIN, D.; HU, J. Multi-objective optimization design and performance evaluation for plug-in hybrid electric vehicle powertrains. **Applied Energy**, Elsevier, v. 208, p. 1608–1625, 2017.

ZULKIFLI, S. et al. Split-parallel through-the-road hybrid electric vehicle: Operation, power flow and control modes. In: IEEE. 2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). [S.l.: s.n.], 2015. P. 1–7.