

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
GUSTAVO SOARES DOS SANTOS**

**APRIMORAMENTO DA COMPETITIVIDADE DO
V.E. EM RELAÇÃO AO MCI: ANÁLISE DA
EFICIÊNCIA DA BATERIA VERSUS CICLO DE
CONDUÇÃO**

**Taubaté – SP
2017**

GUSTAVO SOARES DOS SANTOS

**APRIMORAMENTO DA COMPETITIVIDADE DO V.E. EM RELAÇÃO AO MCI:
ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA BATERIA VERSUS CICLO DE CONDUÇÃO**

Dissertação apresentada para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Mecânica pela
Universidade de Taubaté

Área de concentração: Automação

Orientador: Prof. Dr. Francisco José Grandinetti

Taubaté – SP

2017

GUSTAVO SOARES DOS SANTOS

**APRIMORAMENTO DA COMPETITIVIDADE DO V.E. EM RELAÇÃO AO MCI:
ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA BATERIA VERSUS CICLO DE CONDUÇÃO**

Dissertação apresentada para
obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Mecânica pela
Universidade de Taubaté.

Área de concentração: Automação

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Giuliani Paulineli Garbi INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Assinatura:

Prof. Dr. Francisco José Grandinetti

UNITAU – Universidade de Taubaté

Assinatura:

Prof. Dr. Luis Fernando de Almeida

UNITAU – Universidade de Taubaté

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos professores Francisco José Grandinetti e Luis Fernando de Almeida pela excepcional orientação ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao Professor Giuliani Paulineli Garbi pela excelente contribuição e sugestões oferecidas para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais pelo apoio incondicional oferecido.

À minha esposa Priscila Januário e ao meu filho João Felipe pelo apoio e compreensão ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À UNITAU – Departamento de Engenharia Mecânica, pela oportunidade de aprimorar meus conhecimentos neste tema que acredito ser de extrema importância e relevância para a sociedade.

RESUMO

Em meio as questões ambientais levantadas e discutidas nos últimos anos, o tema Veículos Híbridos e Veículos Elétricos, tem sido amplamente discutido e estudado pela sociedade civil e pela comunidade acadêmica. A quantidade de automóveis no Brasil no ano de 2016 já tinha ultrapassado a quantidade de 51 milhões de automóveis, sendo que a grande maioria deste total são movidos a combustíveis fósseis; esta frota atualmente é responsável pela emissão de aproximadamente 96 milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO₂). Diante deste cenário, os veículos puramente elétricos, surgem como uma opção para que seja reduzida a quantidade de poluentes emitidos no Brasil. Este trabalho teve como proposta estudar e analisar a arquitetura de um veículo convencional transformado em veículo puramente elétrico autossustentável, neste processo de transformação, a proposta foi simular duas propostas de sistema de armazenamento de energia, sendo um banco com baterias chumbo ácido (Pb) e outro banco com baterias de lítio-íon (Li-íon), considerando três opções de transmissões com diferentes relações de marcha. Neste trabalho foram utilizados os softwares *MATLAB* e *ADVISOR* para a modelagem e simulação, sendo que as simulações foram realizadas utilizando três ciclos de condução que representam condições de rodagem em: rodovia, rodovia com subida de serra e cidade, sendo todas as condições baseadas em rotas na região do Vale do Paraíba Paulista. Ao final da simulação dos modelos propostos foi apresentada uma comparação entre os modelos de sistema de armazenamento de energia propostos, considerando relação de transmissão e ciclos de condução com base no modelo do veículo puramente elétrico em desenvolvimento no Departamento de Engenharia Mecânica da UNITAU.

Palavras-chave: *ADVISOR*, Ciclos de Condução, Armazenamento de energia, Veículos Elétricos, Matlab.

ABSTRACT

Among the environmental issues raised and discussed in recent years, the topic Hybrid Vehicles and Electric Vehicles, has been widely discussed and studied by civil society and the academic community. The number of automobiles in Brazil in the year 2016 had already exceeded the number of 51 million cars, the great majority of this total being driven by fossil fuels; This fleet is currently responsible for the emission of approximately 96 million tons of carbon dioxide (CO₂). Given this scenario, purely electric vehicles appear as an option to reduce the amount of pollutants emitted in Brazil. This work aimed to study and analyze the model of a conventional vehicle transformed into a electric vehicle self-sustaining, in this transformation process, the proposal was to simulate two proposals of energy storage system, being a bank with lead acid batteries (Pb) and another bank with lithium-ion (Li-ion) batteries, considering three transmission options with different gear ratios. In this work, the MATLAB and ADVISOR software were used for modeling and simulation. Simulations were carried out using three driving cycles that represent the conditions of running in: highway, highway with ascent of mountain and city, all conditions being based on routes in the *Vale do Paraíba Paulista* region. At the end of the proposed simulation models, a comparison was made between the proposed energy storage system models considering gear ratio and driving cycles based on electric vehicle model under development at the *UNITAU* Department of Mechanical Engineering.

Keywords: ADVISOR; Driving Cycles; Energy storage; Electric Vehicles; Matlab

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados básicos veículo Volkswagen Saveiro	49
Tabela 2	Dados inseridos no software ADVISOR	72
Tabela 3	Tipo de transmissão e relações de marcha	73
Tabela 4	Eficiência energética (Pb) na rota São José dos Campos X Caçapava	75
Tabela 5	Eficiência energética (Pb) na rota Tremembé X Capivari	78
Tabela 6	Eficiência energética (Pb) na rota Taubaté X Tremembé	81
Tabela 7	Dados inseridos no software ADVISOR	81
Tabela 8	Eficiência energética (Li-íon) na rota São José dos Campos X Caçapava	84
Tabela 9	Eficiência energética (Pb) na rota Tremembé X Capivari	87
Tabela 10	Eficiência energética (Li - íon) na rota Taubaté X Tremembé	90
Tabela 11	Melhor configuração veicular em função da rota de utilização	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxograma do método de simulação no software ADVISOR	20
Figura 2	Toyota Prius 1997	24
Figura 3	Tesla Roadster	24
Figura 4	Arquitetura de veículo puramente elétrico	26
Figura 5	Modelos de configurações de veículos puramente elétricos	27
Figura 6	Classificação dos veículos híbridos	28
Figura 7	Toyota Prius modelo 2017	30
Figura 8	Arquitetura Toyota Prius	31
Figura 9	Bateria eletroquímica	32
Figura 10	Circuito equivalente bateria eletroquímica	33
Figura 11	Curva de descarga para uma bateria eletroquímica	34
Figura 12	Vista lateral bateria chumbo ácido	35
Figura 13	Esquema de funcionamento eletrodos e separador para processos de carga e descarga em baterias NiMH	37
Figura 14	Representação esquemática do funcionamento de uma bateria Li-ion	38
Figura 15	Princípio de funcionamento do capacitor	40
Figura 16	Circuito equivalente ultracapacitor	41
Figura 17	Diagrama de blocos funcional de um sistema de propulsão elétrica	43
Figura 18	Classificação de máquinas elétricas tracionárias aplicadas a VE e VEH	44
Figura 19	Volkswagen Saveiro	47
Figura 20	Modelo de VE utilizado para desenvolvimento do protótipo	48

Figura 21	Curva de rendimento X Potencia nominal para motor WEG W22	50
Figura 22	Curva de Rendimento especifica para motor WEG W22 com 25cv	50
Figura 23	Principais componentes da máquina elétrica estudada	51
Figura 24	Circuito equivalente para modelagem de baterias	52
Figura 25	Inversor de frequência WEG CFW 11	54
Figura 26	Ciclo ECE 15	56
Figura 27	Ciclo EUDC	57
Figura 28	Ciclo EUDCL	57
Figura 29	Ciclo NEDC	58
Figura 30	Ciclo FTP – 72	59
Figura 31	Ciclo de condução FTP – 75	60
Figura 32	Ciclo de condução NYCC	61
Figura 33	Ciclo de condução US 06	62
Figura 34	Ciclo 10-15 Mode	63
Figura 35	Ciclo de condução Cleveland	66
Figura 36	Rota São José dos Campos X Caçapava	66
Figura 37	Nível de elevação no ciclo de condução <i>VAIL2NREL</i>	67
Figura 38	Ciclo de condução <i>VAIL2NREL</i>	67
Figura 39	Rota Tremembé X Capivari	68
Figura 40	Rota Taubaté X Tremembé	69
Figura 41	Tela de dados de entrada para veículo puramente elétrico	70
Figura 42	Diagrama de blocos do veículo puramente elétrico	71

Figura 43	Resultados ciclo <i>Cleveland</i> utilizando apenas a 2ª marcha (Pb)	73
Figura 44	Resultados ciclo <i>Cleveland</i> utilizando 5 marchas (Pb)	74
Figura 45	Resultados ciclo <i>Cleveland</i> utilizando apenas a 1ª marcha (Pb)	74
Figura 46	Resultados ciclo <i>VAIL2NREL</i> utilizando 5 marchas (Pb)	76
Figura 47	Resultados ciclo <i>VAIL2NREL</i> utilizando apenas a 2ª marcha (Pb)	76
Figura 48	Resultados ciclo <i>VAIL2NREL</i> utilizando apenas a 1ª marcha (Pb)	77
Figura 49	Resultados ciclo <i>FTP – 72</i> utilizando 5 marchas (Pb)	79
Figura 50	Resultados ciclo <i>FTP – 72</i> utilizando apenas a 2ª marcha (Pb)	79
Figura 51	Resultados ciclo <i>FTP – 72</i> utilizando apenas a 1ª marcha (Pb)	80
Figura 52	Resultados ciclo <i>Cleveland</i> utilizando 5 marchas (Li - íon)	82
Figura 53	Resultados ciclo <i>Cleveland</i> utilizando apenas a 2ª marcha (Li - íon)	83
Figura 54	Resultados ciclo <i>Cleveland</i> utilizando apenas a 1ª marcha (Li - íon)	83
Figura 55	Resultados ciclo <i>VAIL2NREL</i> utilizando 5 marchas (Li - íon)	85
Figura 56	Resultados ciclo <i>VAIL2NREL</i> utilizando apenas a 2ª marcha (Li - íon)	85
Figura 57	Resultados ciclo <i>VAIL2NREL</i> utilizando apenas a 1ª marcha (Li - íon)	86
Figura 58	Resultados ciclo <i>FTP – 72</i> utilizando 5 marchas (Li - íon)	88

Figura 59	Resultados ciclo <i>FTP</i> – 72 utilizando apenas a 2ª marcha (Li - íon)	88
Figura 60	Resultados ciclo <i>FTP</i> – 72 utilizando apenas a 1ª marcha (Li - íon)	89
Figura 61	Autonomia em Km dos modelos simulados	92

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADVISOR	<i>Advanced Vehicle Simulator</i>
ARTEMIS	<i>Assessment and reliability of transport emission models and inventory systems</i>
BJT	<i>Bipolar – Junction Transistor</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
CC	Tensão Contínua
CA	Tensão Alternada
CAFE	<i>Corporate Average Fuel Economy</i>
CO ₂	<i>Dióxido de Carbono</i>
DC	<i>Direct Current motor</i>
DOD	<i>Depth of Discharge</i>
DOE	<i>Department of Energy</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
E-22	Mistura de 22% de Etanol com 78% de Gasolina
ECE – 15	<i>Economic Commission for Europe</i>
EM	<i>Electromagnetic</i>
EUDC	<i>Extra Urban Driving Cycle</i>
EUDCL	<i>Extra Urban Driving Cycle Low power</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FTP - 72	<i>Federal Test Procedure 72</i>
FTP - 75	<i>Federal Test Procedure 75</i>
FOC	<i>Field Oriented Control</i>
Fuzzy	<i>Fuzzy Control</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
GTO	<i>Gate turn – off Thyristor</i>
HMI	<i>Human Interface Machine</i>
HWFET	<i>Highway Fuel Economy Test</i>
IGBT	<i>Insulated – gate bipolar transistor</i>

IM	<i>Induction Motor</i>
Li-ion	Lítio - íon
MARC	<i>Model Reference Adaptive Control</i>
MCI	Motor com combustão interna
MCT	<i>MOS – Controlled Thyristor</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
MOSFET	<i>Metal – oxide Field – effect transistor</i>
NBR	Norma Brasileira
NEDC	<i>New European Drive Cycle</i>
NiCd	Níquel - Cádmio
NiMH	Níquel – hidreto metálico
NNC	<i>Neural Network Control</i>
NYCC	<i>New York City Cycle</i>
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
Pb	Chumbo Ácido
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RPM	Rotações por minuto
SEI	<i>Solid electrolyte interphase</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
SOHIO	<i>Standard Oil Company Ohio</i>
STC	<i>Self – tuning Control</i>
VE	Veículo Elétrico
VEH	Veículo Elétrico Híbrido
VSC	<i>Variable Structure Control</i>
VVVF	<i>Variable Voltage Variable Frequency</i>
UNITAU	Universidade de Taubaté
US06	<i>Supplemental Federal Test Procedure</i>

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xii
SUMÁRIO	xiv
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO	18
1.1.1 Objetivos Gerais	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
1.2 METODOLOGIA	19
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 HISTÓRIA VEÍCULOS ELÉTRICOS E VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS	22
2.2 TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS	25
2.2.1 Veículos Puramente Elétricos	25
2.2.2 Veículo Híbrido Elétrico	28
2.3 TIPOS DE ARMAZENADORES DE ENERGIA	31
2.3.1 Baterias Eletroquímicas	32
2.3.1.1 Baterias Chumbo Ácido	34
2.3.1.2 Baterias Níquel-Cádmio	36
2.3.1.3 Baterias Níquel-Hidreto Metálico	36
2.3.1.4 Baterias Lítio-Íon	37
2.3.2 Ultracapacitores	39
2.4 INVERSORES DE FREQUÊNCIA	42
2.5 MÁQUINAS ELÉTRICAS APLICADAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS	42
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	47
3.1 CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO	47

3.1.1	Dados máquina elétrica adotada no protótipo	49
3.1.2	Modelagem das propostas de banco de baterias	51
3.1.3	Características Inversor de frequência	54
3.2	CICLOS DE CONDUÇÃO	55
3.2.1	Ciclos de condução Europeus	56
3.2.1.1	ECE 15	56
3.2.1.2	EUDC	56
3.2.1.3	EUDCL	57
3.2.1.4	NEDC – New European Drive Cycle	58
3.2.1.5	ARTEMIS	58
3.2.1.6	HYZEM	58
3.2.2	Ciclos de condução Norte Americanos	59
3.2.2.1	FTP 72	59
3.2.2.2	SFUDS	60
3.2.2.3	FTP – 75	60
3.2.2.4	HWFET – Highway Fuel Economy Test	60
3.2.2.5	LA 92	61
3.2.2.6	NYCC	61
3.2.2.7	US 06	61
3.2.3	Ciclos de condução Japoneses	62
4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MODELOS PROPOSTOS	64
4.1	SOFTWARE ADVISOR – ADVANCED VEHICLE SIMULATOR	64
4.2	CICLOS DE CONDUÇÃO UTILIZADOS NO ADVISOR	65
4.2.1	Rota São José dos Campos X Caçapava – Cleveland	65
4.2.2	Rota Tremembé X Capivari – VAIL2NREL	66
4.2.3	Rota Taubaté X Tremembé – FTP - 72	68
4.3	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM O SOFTWARE ADVISOR	69
4.4	SIMULAÇÃO DE MODELO DE BANCO BATERIAS CHUMBO ÁCIDO (PB) PROPOSTO PARA O VE	72
4.4.1	Simulação considerando rota São José dos Campos X Caçapava – Cleveland	73

4.4.2	Simulação considerando rota Tremembé X Capivari – VAIL2NREL	75
4.4.3	Simulação considerando rota Taubaté X Tremembé – FTP – 72	78
4.5	SIMULAÇÃO DE MODELO DE BANCO BATERIAS LÍTIO – ÍON (LI-ÍON) PROPOSTO PARA O VE	81
4.5.1	Simulação considerando rota São José dos Campos X Caçapava – Cleveland	82
4.5.2	Simulação considerando rota Tremembé X Capivari – VAIL2NREL	84
4.5.3	Simulação considerando rota Taubaté X Tremembé – FTP – 72	87
5	ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS SIMULADOS	91
6	CONCLUSÕES	94
6.1	TRABALHOS FUTUROS	96
	REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA	98
	APÊNDICE A – ALTERAÇÕES NOS PARAMETROS DA SIMULAÇÃO	102

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos os veículos elétricos vêm se tornando cada vez mais importantes na sociedade. Essa importância não se dá apenas por questões ambientais e ruídos; e no caso do Brasil, por uma questão de dependência do petróleo, uma vez que a matriz de energia elétrica utilizada no país na sua grande maioria, não se deriva do petróleo. Dados do Ministério de Minas e Energia (MME) apontam que em janeiro de 2016, cerca de 76,5% da energia gerada no país foi de origem hídrica e outros 3% de origem eólica (MME, 2017). O aquecimento global vem sendo amplamente discutido em todo o mundo. Ele é basicamente, causado com a liberação de dióxido de carbono quando os combustíveis fósseis são queimados e a partir do aquecimento, tem-se uma série de problemas climáticos desencadeados (BARAN; LEGEY, 2010).

Considerando que as reservas de petróleo deverão durar por mais 40 anos, a escassez é inevitável e poderá resultar em utilização de outros combustíveis fósseis que podem não ser economicamente viáveis. Desta forma, pode-se ter um colapso no quesito abastecimento da frota brasileira (PORTILHO, 2016). Neste contexto, o veículo puramente elétrico surge como uma opção que deve ser considerada para auxiliar na solução deste colapso. O Veículo Elétrico (VE) é um tipo de veículo que possui um motor elétrico que são alimentados por baterias recarregáveis e ultracapacitores. Esses armazenadores transformam a energia química armazenada nas baterias e ultracapacitores, em energia elétrica que proporcionam o funcionamento do motor, que por sua vez, converte em energia mecânica entregando essa energia de forma direta nas rodas ou através de uma transmissão, possibilitando a locomoção do veículo (BAISDEN; EMADI, 2004).

Essa dissertação consiste na apresentação do sistema de armazenamento de energia como um componente fundamental na arquitetura de um VE, além de apresentar que o tipo de armazenador de energia adotado em uma configuração de veículo está diretamente relacionado à rota de que o veículo será submetido: Cidade, Auto estrada ou a combinação de ambos.

Para a escolha da melhor configuração a ser adotada, nesta pesquisa foram: Elaboradas e simuladas arquiteturas veiculares utilizando os softwares Matlab e ADVISOR, considerando a aplicação em rotas similares a condições encontradas na região do Vale do Paraíba Paulista. Esses modelos consideram um tipo de

armazenador de energia e transmissão diferentes para cada proposta de aplicação do veículo. Ao final do trabalho, espera-se ter informações sobre qual o melhor sistema de armazenamento de energia para ser aplicado ao protótipo de VE.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho propõe um estudo sobre sistemas de armazenamento de energia aplicados a VE, utilizando como base o protótipo de veículo puramente elétrico atualmente em desenvolvimento nas dependências do Departamento de Engenharia Mecânica da UNITAU. Além disso, realizar simulações considerando o desenvolvimento de armazenadores de energia com baterias de chumbo ácido (Pb) e baterias de Lítio-Íon (Li-ion) e considerando diferentes possibilidades de relações de transmissão em diferentes ciclos de condução.

Ao final deste trabalho espera-se ter informações necessárias para auxiliar na escolha da melhor opção de banco de baterias e relação de transmissão a serem utilizadas no veículo e ainda quais são os benefícios de cada modelo proposto considerando os ciclos de condução apresentados.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo principal deste trabalho, os objetivos específicos abaixo foram delimitados:

- 1) Realizar uma revisão bibliográfica sobre história da eletrificação veicular, tipos de veículos elétricos; colocando em destaque seus principais componentes: tipos de armazenadores de energia e motores elétricos;
- 2) Modelar e implementar nos softwares Matlab/Simulink e ADVISOR a arquitetura veicular puramente elétrica utilizando banco de baterias chumbo ácido (Pb) e Lítio-íon (Li-íon).
- 3) Reproduzir com auxílio do software ADVISOR o funcionamento do VE, simulando a utilização das arquiteturas veiculares estudadas, com ciclos de condução que se assemelham a rotas de autoestrada e cidade na região do Vale do Paraíba Paulista.

- 4) Simular com auxílio do software ADVISOR, o comportamento do VE utilizando diferentes opções de relações de marcha de uma transmissão do tipo manual com 5 velocidades.
- 5) Apresentar comparativo entre os sistemas de armazenamento de energia com baterias de chumbo ácido (Pb) e baterias de Litio-íon (Li-íon), considerando diferentes tipos de relação de transmissão e tipos de rodagem.

1.2 METODOLOGIA

Segundo Silva e Menezes (2005), do ponto de vista da forma de abordagem do problema, essa pesquisa é classificada como quantitativa, pois trata-se da análise de dados obtidos através de simulações realizadas através dos softwares Matlab e ADVISOR.

A presente pesquisa foi elaborada a partir ampla pesquisa bibliográfica o que forneceu uma sólida base de conhecimento para a elaboração dos modelos propostos e posteriormente submetidas ao experimento através de simulações.

O veículo utilizado como base no desenvolvimento da pesquisa foi um modelo Volkswagen Saveiro (ano/modelo: 92/92) que se encontra atualmente em processo de transformação para um veículo puramente elétrico, a partir deste veículo foi modelado um VE com auxílio dos softwares com objetivo de reproduzir o funcionamento do veículo conforme as condições propostas. A implementação da simulação foi realizada conforme fluxograma apresentado na figura 1.

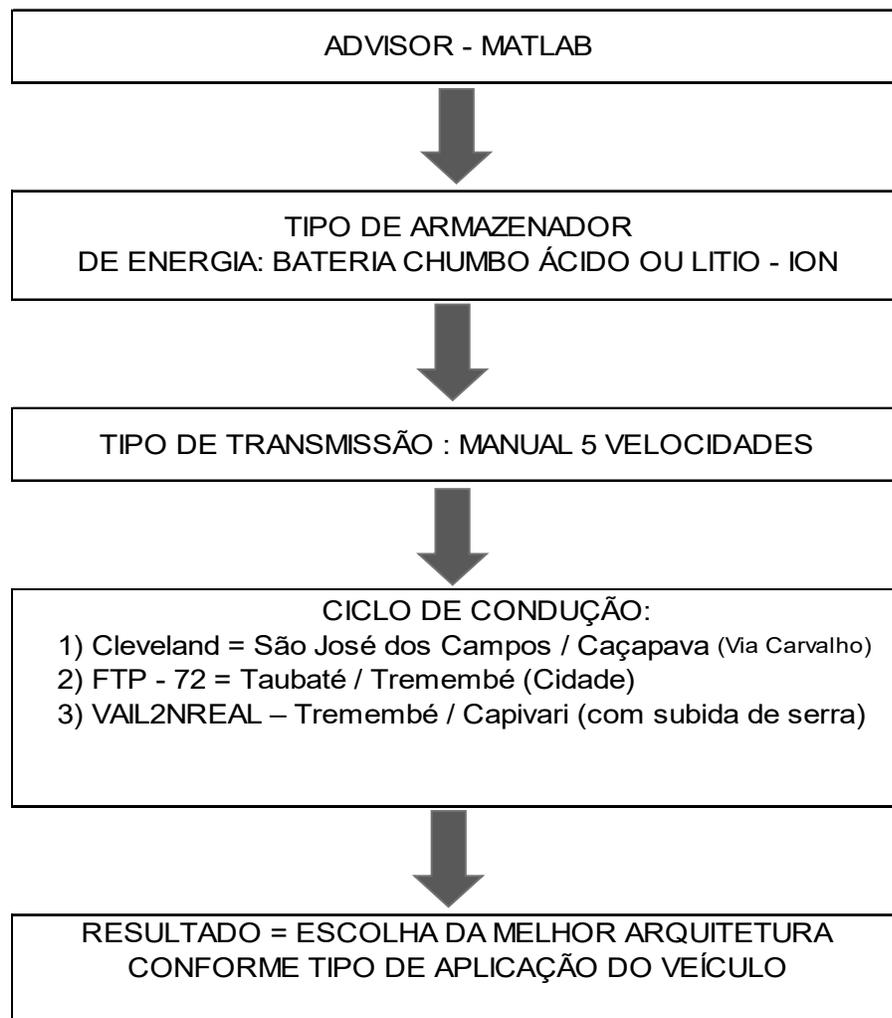


Figura 1: Fluxograma do método de simulação no software ADVISOR

Fonte: Autor, 2017

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

- No capítulo 1, tem-se uma breve introdução sobre o tema VE e a apresentação dos objetivos do trabalho;
- O capítulo 2, apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais tópicos envolvidos na construção de VE e VEH. Os tópicos abordados neste capítulo são: história do VE e VEH; tipos de VE e VEH; tipos de Armazenadores de Energia e máquinas elétricas aplicadas em veículos elétricos;

- No capítulo 3, a fundamentação teórica do trabalho é apresentada, incluindo detalhamento sobre: O veículo base utilizado na transformação, dados de máquina elétrica adotada, características de banco de baterias e inversor de frequência utilizados na concepção do modelo utilizado nas simulações e o conceito sobre os ciclos de condução;
- O capítulo 4, apresenta a simulação dos modelos propostos, para realizar a implementação dos modelos foram considerados 3 ciclos de condução que se assemelham a rotas urbanas e rodoviárias, além de apresentar o software ADVISOR que é utilizado para realização das simulações dos modelos propostos;
- No capítulo 5, são analisados e discutidos os resultados obtidos nas simulações realizadas;
- O capítulo 6, apresenta uma conclusão do estudo realizado, apresentando os principais resultados encontrados no trabalho e as propostas de trabalhos que poderão ser desenvolvidos no futuro tendo como base o estudo desenvolvido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTÓRIA VEÍCULOS ELÉTRICOS E VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS

A história dos veículos elétricos pode começar a ser descrita com a criação da primeira pilha em 1800 pelo físico Italiano Alessandro Volta, que funcionava com um par de discos de cobre e zinco empilhados verticalmente e separados por uma camada de pano ou papelão encharcados de solução salina. Essa pilha era capaz de gerar uma corrente elétrica contínua e perdia pouca carga quando não utilizada. Em contrapartida, essa pilha não produzia tensão necessária para produção de fagulhas e durava no máximo uma hora e ainda produzia bolhas de hidrogênio o que aumentava a resistência interna da bateria e por consequência diminuía sua eficiência (WESTBROOK, 2007).

Em 1821, o primeiro motor elétrico foi desenvolvido por Michael Faraday quando ele buscou a correlação entre eletricidade e eletromagnetismo durante um experimento transformando energia elétrica em energia mecânica. Alguns anos depois, em 1873, tem se notícia do desenvolvimento do primeiro motor elétrico acima de 1CV com performance confiável (WESTBROOK, 2007).

O primeiro VE foi construído pelo francês Gustave Trouve em 1881, este veículo era um triciclo movido por um motor de 0,1 CV alimentado por baterias chumbo ácido (WESTBROOK, 2007).

Em 1883, um veículo similar ao desenvolvido por Gustave, foi idealizado e construído por dois professores britânicos, mas essas idealizações não atraíram muitas atenções, pois os veículos construídos não tinham tecnologias suficientes para competir com as carruagens de cavalos muito comuns na época e alcançavam velocidades máximas de 16km/h. Isso começou a mudar em 1864 quando em uma corrida cerca de 1.135km foi realizada em 48h e 53min, a uma velocidade média de 23,3km/h. Essa velocidade média era muito superior as das carruagens da época, resultando no interesse pelo público por este tipo de automóvel. Esse interesse foi crescente durante os anos seguintes, pois o VE se consolidou no mercado e começou a competir com os veículos movidos a gasolina. Nessa mesma época também surgiu Electroboat que foi o primeiro táxi elétrico na cidade de Nova Iorque, que fez muito sucesso na época devido a sua autonomia que era de 4h horas de

operação para 90 minutos de recarga podendo percorrer cerca de 40km e a uma velocidade máxima de 32 km/h (EHSANI et al., 2010).

Durante esta época surgiram vários inventos que foram agregados aos automóveis, mas o que mais se destaca pela aplicabilidade em VE e VEH é a invenção do francês M.A Darracq que foi a frenagem regenerativa que permite o aproveitamento da energia cinética durante a frenagem para recargas das baterias, o que fez a eficiência energética dos VE da época atingissem índices satisfatórios no ciclo de condução urbano (EHSANI et al., 2010).

Em 1905, a utilização dos VE entrou em decadência, pois os Veículos a Combustão se tornaram mais potentes, mais flexíveis nos quesitos autonomia e tempo de recarga e o alto custo do VE também não ajudava (EHSANI et al., 2010).

Com o avanço da eletrônica após a segunda grande guerra mundial, foram desenvolvidas soluções no campo da eletrônica que foram fundamentais para o ressurgimento dos VE nas próximas décadas. Em 1966, a General Motors construiu o protótipo Eletrovan que utilizava motores de indução na propulsão e utilizavam inversores na sua alimentação, e tais inversores, utilizavam tiristores na sua construção. Durante os anos de 1972 e 1973 o VE mais moderno e importante da época foi o Veículo Lunar que os astronautas da missão americana Apollo utilizaram, este veículo pesava cerca de 209 kg com capacidade de carga de 490kg e uma autonomia de 65km (EHSANI et al., 2010).

Durante a década de 80 algumas montadoras trabalharam em projetos de veículos puramente elétrico, mas só no início da década de 90 ocorreram alguns lançamentos de veículos como EV1 da GM e o 106 Electric da PSA. Esses lançamentos mostraram que, embora fossem um grande avanço, os VE ainda não eram competitivos frente aos veículos que utilizavam motores à combustão interna. O grande caminho crítico era a questão das baterias que eram muito pesadas e com isso, implicavam uma série de limitações. A partir de tal fatos, a indústria automotiva começa a avançar em pesquisas com VEH. A Ford lançou o Desafio Ford de Veículos Híbridos Elétricos, que tinha como objetivo desenvolver veículos híbridos a partir de modelos de produção com MCI (EHSANI et al., 2010).

Em 1997, destaca-se o surgimento do maior acontecimento da era moderna dos veículos híbridos: as japonesas Honda e Toyota lançaram os veículos Insight e Prius, respectivamente. Na Figura 2 é ilustrado Toyota Prius no ano do seu

lançamento. Esses veículos são vendidos, atualmente, em todo o mundo e ainda se destacam pelo excelente desempenho de consumo em ambos.



Figura 2 – Toyota Prius 1997

Fonte: Autor, 2017

No final dos anos 2000, a Tesla lançou o veículo esportivo Tesla *Roadster* que pode fazer de 0 a 100 km/h em apenas 3,9 segundos com uma autonomia de aproximadamente 350km. A Figura 3 mostra um modelo *Roadster*. Em 2012, a Tesla lançou o *Model S* e, até os dias de hoje, vem dominando o mercado mundial de veículos puramente elétrico.



Figura 3 – Tesla Roadster

Fonte: Autor, 2017

2.2 TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS E VEÍCULOS ELÉTRICOS HÍBRIDOS

Os veículos elétricos híbridos e veículos puramente elétricos podem ser divididos em quatro arquiteturas veiculares:

- Veículo Puramente Elétrico: esse tipo de veículo possui apenas motores elétricos como responsáveis pela tração do veículo. Dentro deste grupo de veículo tem-se os veículos movidos a energia solar, os veículos ligados direto a rede distribuição (Trólebus) e veículos elétricos a bateria.
- Veículos Híbridos Elétrico: essa configuração de veículos tem como principal característica a utilização de dois motores, sendo um motor elétrico e um motor a combustão. Estes motores podem ser utilizados utilizando algumas possíveis configurações que serão descritas nesta capítulo.
- Veículos Híbridos Elétricos Plug in: esta arquitetura veicular é muito similar à de um veículo puramente elétrico, pois, geralmente, utiliza motores elétricos para tracionar o veículo. O que difere este veículo de um puramente elétrico é a forma de recarga do banco de armazenadores de energia, pois para a realização da recarga são utilizados motores a combustão para a geração de energia necessária para a recarga dos armazenadores.
- Veículos movidos a células de combustível: são veículos que combinam hidrogênio e oxigênio para gerar energia elétrica e utilizam esta energia gerada para alimentar motores elétricos.

2.2.1 Veículos Puramente Elétricos

O veículo puramente elétrico é o que possui a arquitetura veicular elétrica mais simples, pois é composto por um sistema de baterias para armazenamento da energia, um motor elétrico (geralmente de corrente alternada) e um sistema de controle. As baterias podem ser recarregadas em uma tomada normal utilizando um carregador que pode ou não estar acoplado à arquitetura do veículo. A Figura 4 exemplifica um veículo com esta arquitetura. O sistema de controle tem como objetivo controlar a energia fornecida ao motor, isto é, controlar a velocidade do

veículo. Esse tipo de controle é conhecido como controlador de dois quadrantes, pois é capaz de controlar o veículo para frente e em marcha ré. Outra opção de controle e muito utilizada atualmente é o controlador de 4 quadrantes que é utilizado quando o veículo possui a opção de regeneração de energia durante as frenagens.

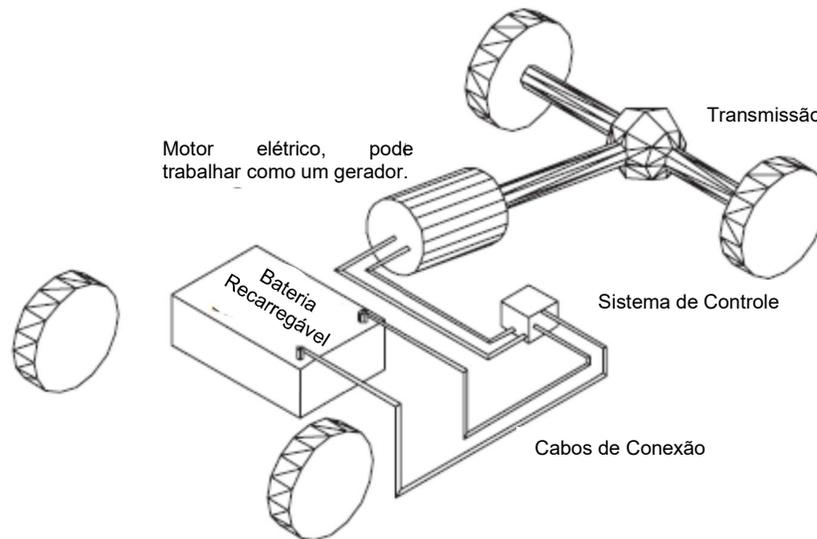


Figura 4 – Arquitetura de veículo puramente elétrico

Fonte: LARMINIE; LOWRY, 2012

Os sistemas de controle atualmente são dotados de conversores eletrônicos de potência, que têm se tornado cada vez mais leves, menores e com ótimos desempenho. Os circuitos eletrônicos retificadores, inversores e conversores são considerados conversores estáticos, que têm como objetivo o controle do fluxo de energia entre a fonte e carga (motor elétrico), atuando na variação do valor da tensão elétrica e/ou do formato de onda atual da fonte de energia através de uma série de comutações executadas pelas chaves eletrônicas, também chamadas de interruptores estáticos (RASHID, 1999).

Os circuitos eletrônicos inversores e conversores cc-cc, funcionam de forma conjunta ou individual, esses circuitos trabalham, basicamente, gerenciando o funcionamento da tração do veículo e a recarga do banco de baterias. Abaixo temos exemplo de configurações de acionamento e armazenamento de VE.

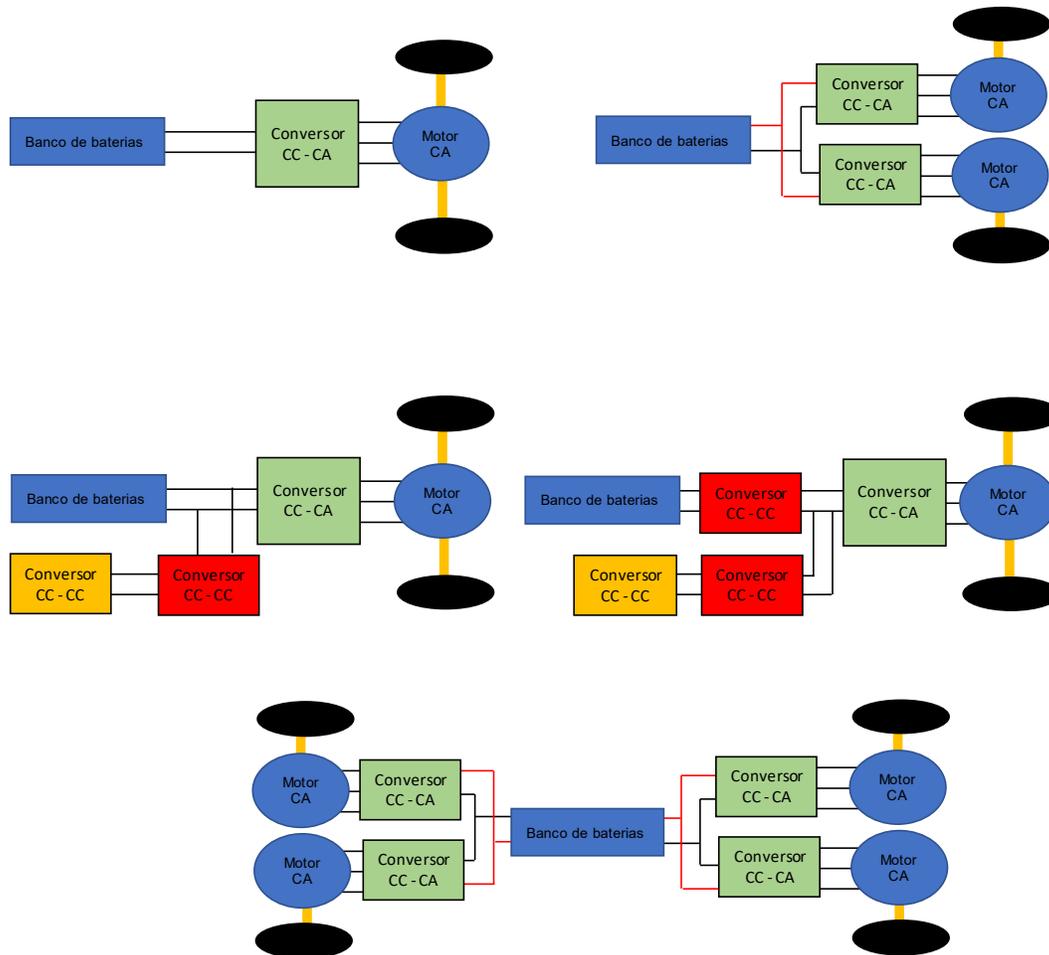


Figura 5 – Modelos de configurações de veículos puramente elétricos

Fonte: MELO, 2014

Os modelos apresentados na Figura 5, utilizam conversores cc-cc e conversores cc-ca, sendo os conversores cc-cc sempre ligados as fontes de energia (armazenadores) e conversores cc-ca ligados aos motores elétricos sendo responsáveis pelo acionamento dos mesmos.

Muhammad Rashid em seu livro Eletrônica de Potência, menciona que conversores cc-cc são circuitos eletrônicos que recebem um nível de tensão contínua (cc) em seus terminais de entrada e regulam essa tensão recebida para um nível de tensão contínua (cc) desejado no terminal de saída. Os conversores cc-ca, são conhecidos no mercado com inversores, e são um circuito eletrônico que

transformam tensão contínua (cc) em tensão alterada (ca) e são empregados para acionamento de motores de corrente alternada.

2.2.2 Veículo Híbrido Elétrico

Veículo Híbrido Elétrico é um veículo que possui duas ou mais fontes de energia, além da energia elétrica. A segunda fonte de energia pode ser um motor de combustão interna ou células de combustível. As configurações mais utilizadas de veículos híbridos utilizam a combinação de um motor a combustão, banco de baterias, um motor elétrico e um gerador.

Os veículos híbridos podem ser divididos em veículos híbridos em série, veículos híbridos paralelo e veículos híbridos série – paralelo. A Figura 6 mostra o princípio de funcionamento de cada configuração, com um tanque de combustível, um motor a combustão, um motor elétrico e baterias.

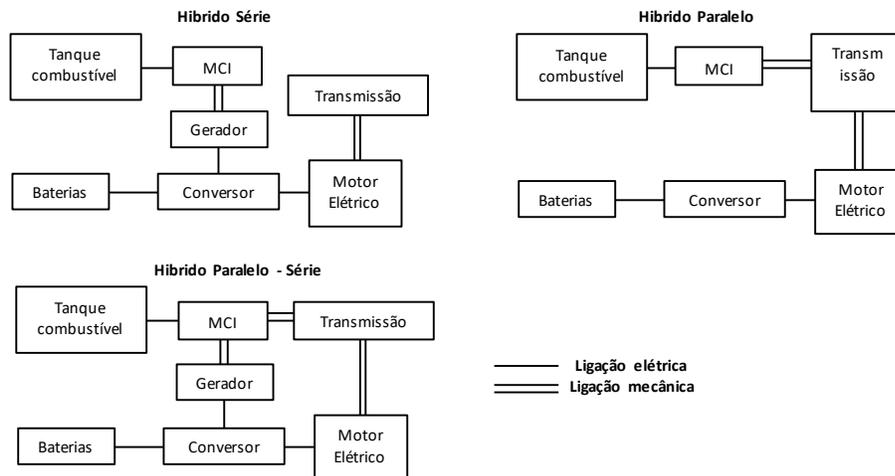


Figura 6 – Classificação dos veículos híbridos

Fonte: EHSANI, 2010

Na configuração em série o veículo utiliza o MCI para gerar eletricidade para alimentar o motor elétrico e se a energia gerada for além da necessária para o funcionamento do motor, esta energia é direcionada para as baterias e ultracapacitores. Nesta configuração, o grande desafio é a vida útil da bateria,

levando em consideração, o fato de que a maioria dos bancos, utiliza baterias chumbo ácido, a execução de um grande número de ciclo de recarga das baterias torna-se um problema nessa configuração, outro fator que se deve considerar nesta configuração é que, o processo de conversão de energia do MCI (queima do combustível) para geração de energia mecânica, tem-se uma grande perda neste processo, pois o MCI tem uma baixa eficiência energética. Com o desenvolvimento da eletrônica, tem-se, atualmente, sistemas de gerenciamento de energia que conseguem tornar o conjunto série em um conjunto com uma eficiência bem maior quando comparado a veículos da década de 90.

Na configuração em paralelo, a grande diferença é que ambos motores: Elétrico e MCI podem ser utilizados para movimentação do veículo, mas geralmente nesta configuração, o motor elétrico auxilia o MCI durante o funcionamento do veículo. Outro fato é que o motor elétrico nesta configuração é menor que o MCI; ou seja, o motor elétrico utilizado na configuração paralelo, geralmente é menor que o utilizado na configuração em série.

Esta configuração é amplamente utilizada pela indústria automotiva até os dias de hoje, pois proporciona uma fonte auxiliar de alimentação e desta forma, o MCI tem um incremento de potência e ainda consegue ter autonomia significativamente aumentada e considerável redução nas emissões de poluentes.

Sperling (2013) menciona no seu livro sobre veículos elétricos que no geral a configuração híbrido paralelo é mais complexa e cara que uma configuração em série; na configuração paralela o MCI é desligado e ligado com muita frequência, componentes eletroeletrônicos e mecânicos são necessários para suportar esta necessidade de troca de motores durante o funcionamento; uma estratégia de gerenciamento de energia também deve ser desenvolvida através de algoritmos, esta estratégia na verdade é um sistema de gerenciamento da arquitetura veicular que deve ser capaz de definir quando cada motor deve atuar ou ainda quando ambos motores devem atuar.

Na configuração serie – paralelo tem-se a combinação das configurações série e configuração paralela. A grande diferença dos demais já apresentados é que o motor elétrico e o MCI podem trabalhar em conjunto na tração do veículo em qualquer condição de operação, e ainda ao mesmo tempo em que traciona o veículo o MCI pode trabalhar como um gerador para alimentar as baterias e ultracapacitores.

A Figura 7 exemplifica de forma simplificada a configuração de um veículo híbrido série – paralelo, neste sistema o veículo em velocidades mais baixas funciona como um veículo híbrido série, mas em velocidades mais altas esta configuração em série é menos eficiente, e então o MCI entra em operação. Esse sistema é mais caro do que um paralelo, pois nesta configuração são necessários componentes extras como: gerador, planetário e um sistema robusto de gerenciamento do sistema combinado.



Figura 7 – Toyota Prius modelo 2017

Fonte: Toyota, 2017

O veículo Toyota Prius, atualmente, é o veículo híbrido nesta configuração mais vendido no mundo, sendo que no caso do Prius utiliza-se a o gerador para recarregar as baterias; o motor elétrico também pode ser utilizado para a tracionar as rodas dianteiras em paralelo com o MCI, o inversor que o veículo possui é do modelo bidirecional e que pode ser utilizado para carregar as baterias ou para o direcionamento da energia para o motor elétrico. A classificação apresentada na Figura 8 é baseada na arquitetura veicular do Toyota Prius.

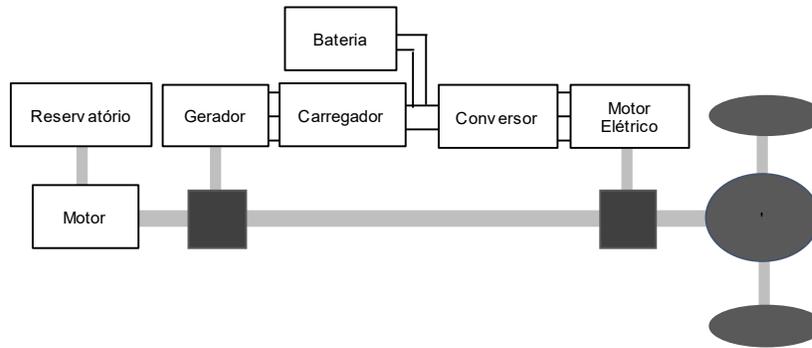


Figura 8 – Arquitetura Toyota Prius

Fonte: Autor, 2017

2.3 TIPOS DE ARMAZENADORES DE ENERGIA

Durante toda a história de desenvolvimento dos VE e VEH, a capacidade de armazenamento de energia dos veículos, sempre foi um limitador para o sucesso deste tipo de propulsão. No início do século passado, quando os veículos a combustão e os VE estavam em ascensão na América, os veículos a combustão prevaleceram durante os próximos anos, em função do tempo de recarga e da autonomia dos veículos. Essa vantagem dos veículos a combustão sobre os VE, tem como principal diferencial a menor densidade de energia que uma bateria tem quando comparado com a gasolina.

Armazenadores de energia são dispositivos capazes de armazenar quantidade finita de energia, além de conseguirem receber e fornecer energia em tensões previamente definida, ou seja, realizam carga e descarga de energia.

Existe um grande número de variáveis que devem ser consideradas para a escolha do armazenador ou do conjunto de armazenadores de energia em um VE ou VEH, os requisitos principais a serem considerados são: Aplicação do VE, potência requerida, energia requerida, custos de manutenção, sistema de gerenciamento de energia a ser aplicado ao sistema, no caso de VE a energia específica é o primeiro item a ser avaliado, pois essa escolha está ligada a itens como autonomia e velocidade final. No caso dos VEH a potência específica, torna-se mais importante e passa a ser o primeiro item a ser avaliado.

No estudo de VE e VEH temos vários tipos de armazenadores de energia propostos para ambas arquiteturas, os principais armazenadores aplicados a esses

veículos serão abordados neste capítulo. Os principais armazenadores utilizados são: Baterias eletroquímicas, ultracapacitores e células de combustível.

2.3.1 Baterias Eletroquímicas

Para Mehrdad (2010), as baterias eletroquímicas são dispositivos eletroquímicos que convertem energia elétrica em energia química durante o carregamento e converte energia química em energia elétrica durante a descarga. Uma bateria geralmente é formada por algumas células empilhadas, essas células na verdade são unidades independentes com propriedades eletroquímicas. Essas células possuem três elementos primários: dois eletrodos (positivos e negativos) imersos em um eletrólito como demonstrado na Figura 9.

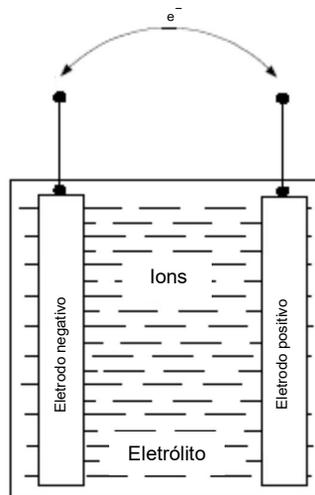


Figura 9 – Bateria eletroquímica

Fonte: EHSANI, 2010

As baterias eletroquímicas têm tensões nominais entregues quando a bateria está no processo de fornecimento de energia, essas baterias geralmente são ligadas em série para que se consiga a tensão total necessária. Baterias para VE geralmente têm tensão de 6 ou 12V, mas atualmente as mais utilizadas são as 12V. Na Figura 10, tem-se um circuito equivalente para uma bateria, onde é apresentada uma tensão fixa E , mas na prática temos uma tensão V diferente nos terminais,

devido à resistência interna que a bateria possui (LARMINIE, 2012; LOWRY, 2012). Se a corrente I estiver saindo da bateria, pode-se entender que:

$$V = E - IR \quad (2.1)$$

Se a corrente I for zero, a tensão E será igual a tensão V , e esta tensão E neste caso, é a tensão de circuito aberto. Se a bateria estiver sendo recarregada, esta tensão aumentará, a tensão, em VE a resistência interna da bateria tende a ser muito baixa.

Fatores como: Temperatura, modo de descarga e outras variáveis devem ser considerados durante a fase de modelagem da bateria a ser utilizada no VE; mas equação 2.1 traz uma boa visibilidade da forma de funcionamento de uma bateria em uso.

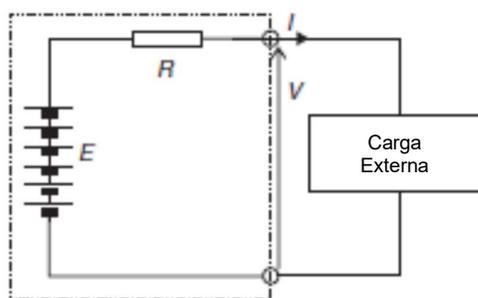


Figura 10 – Circuito equivalente bateria eletroquímica

Fonte: LARMINIE; LOWRY, 2012

A capacidade de fornecimento de energia das baterias é especificada em ampère – hora. Essa capacidade é definida como a quantidade de ampère – hora que uma bateria pode entregar por hora até chegar na tensão de corte determinada para a bateria. A Figura 11 mostra a curva de descarga típica de uma bateria.

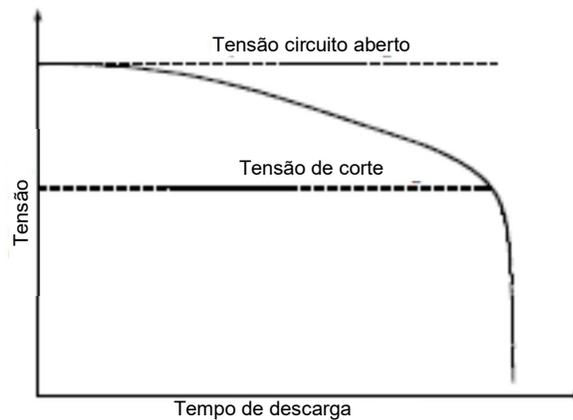


Figura 11 – Curva de descarga para uma bateria eletroquímica

Fonte: EHSANI, 2010

Eficiência energética é um parâmetro muito importante, é definido como a relação entre a energia fornecida pela bateria versus a quantidade de energia necessária para retornar ao estado inicial da bateria, ou seja, antes da descarga. A forma como uma bateria utilizada em um VE é carregada e descarregada, influencia diretamente nesta eficiência energética, pois quanto menor o tempo de recarga e descarga, a eficiência da bateria ou conjunto de bateria é reduzido proporcionalmente.

Outro fenômeno importante que acontece com as baterias e deve ser considerado durante a modelagem, é a auto – descarga; a taxa em que este fenômeno de auto – descarga acontece está ligada com o tipo de bateria e temperatura (LARMINIE, 2012; LOWRY, 2012). Sendo que a temperatura na maioria das baterias não é um problema pois trabalham em temperatura ambiente, mas existem alguns tipos de baterias que precisam de aquecimento e resfriamento para o correto funcionamento; por isso durante a modelagem do banco de baterias em um VE a temperatura deve ser levada em conta em função de alguns fatores, entre eles o local de utilização do VE e a possibilidade de inclusão de sistema de arrefecimento para o banco de baterias.

2.3.1.1 Baterias Chumbo Ácido

A bateria eletroquímica mais utilizada atualmente no setor automotivo é a bateria chumbo ácido, composta por: chumbo, ácido sulfúrico e materiais plásticos.

O chumbo está presente na forma de chumbo metálico, ligas de chumbo, bióxido de chumbo e sulfato de chumbo. O ácido sulfúrico se encontra na forma de solução aquosa com Concentrações variando de 27% a 37% em volume. O anodo é chumbo, o catodo é o óxido de chumbo (Pb) e o eletrólito, solução de ácido sulfúrico. A tensão em cada célula da bateria é de cerca de 2V, por isso uma bateria de 12V tem geralmente 6 células.

Na construção mais comum, anodo e catodo são placas retangulares planas, dispostas e interligadas alternadamente, com separadores de material poroso não condutor para evitar contato elétrico direto. O conjunto fica no interior de uma cuba, submerso no eletrólito de solução de ácido sulfúrico. A Figura 12 abaixo ilustra este conjunto.

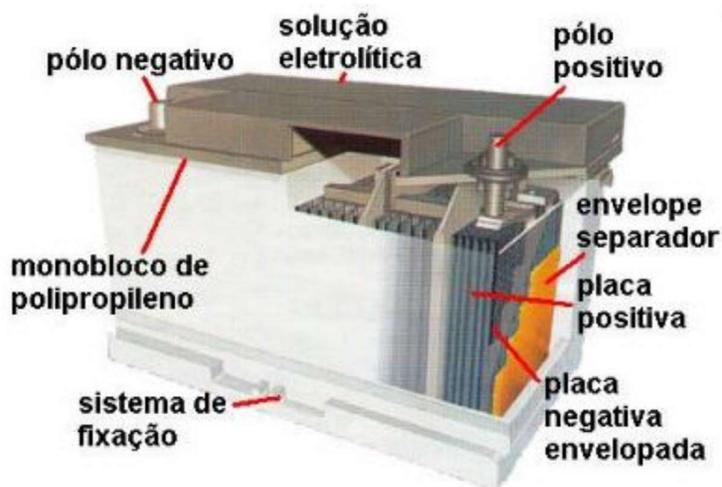
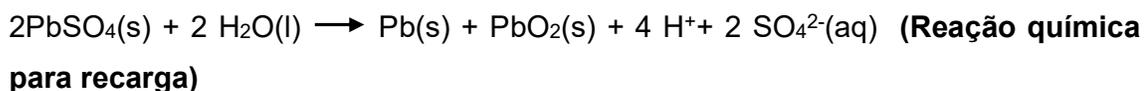
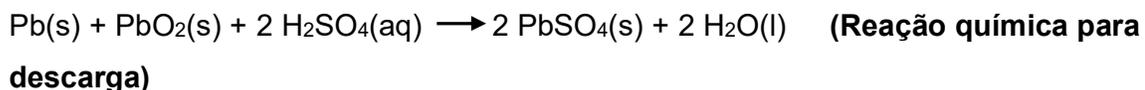


Figura 12 – Vista lateral bateria chumbo ácido

Fonte: Pontes, 2009

As reações químicas que representam os ciclos de carga e descarga são representadas pelas equações abaixo:

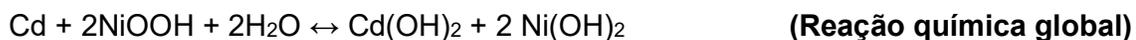


Baterias chumbo ácido, tem um custo de Kw – hora de carga bem acessível, mas possuem baixa energia específica, ou seja, quando aplicadas em VE são

necessárias várias baterias formando um banco de baterias com massa elevada, mas para VEH tem sido muito utilizada.

2.3.1.2 Baterias Níquel-Cádmio

Desde o final do século XIX, diversas baterias utilizando níquel no eletrodo positivo foram desenvolvidas. A bateria Níquel-Cádmio (NiCd) foi considerada uma das principais concorrentes das baterias chumbo ácido para utilização em VE, um dos motivos é que as baterias Níquel-Cádmio possuem quase o dobro de energia específica quando comparado com baterias chumbo-acido. As baterias NiCd utilizam o oxi-hidróxido de níquel para o eletrodo positivo e cádmio metálico para o eletrodo negativo (LARMINIE, 2012; LOWRY, 2012). A energia elétrica é obtida através da seguinte reação:



Esse tipo de bateria, no entanto, tem um alto custo financeiro chegando a ser 3 vezes mais que o das baterias chumbo ácido; além disso o cádmio representar um perigo cancerígeno e ambiental.

2.3.1.3 Baterias Níquel-Hidreto Metálico

As baterias níquel-hidreto metálico (NiMH), foram comercialmente introduzidas no início da última década do século XX, mais precisamente a partir do ano de 1992. Essas baterias têm um funcionamento similar aos das baterias NiCd, sendo que a principal diferença é que na bateria NiMH o eletrodo negativo utiliza hidrogênio absorvido em hidreto de metal, o que torna livre de cádmio. Além disso, as baterias NiMH possuem uma energia específica superior quando comparadas com as baterias NiCd e não são nocivas ao meio ambiente a seres humanos (EHSANI et al., 2010). A reação química global da bateria é:



Devido às características como rápida capacidade de recarga e ciclo de vida longo, essas baterias têm sido cada vez mais utilizadas em configurações de veículos puramente elétricos onde essas características são fundamentais para um bom desempenho (LINDEN, 2002; REDDY, 2002).

Na Figura 13, tem-se o exemplo de funcionamento de bateria NiMH, onde o material ativo do eletrodo positivo no estado carregado é o oxi-hidroxido de níquel. O material ativo para o eletrodo negativo no estado carregado, é o hidrogênio armazenado na forma de hidreto em uma liga. Essa liga pode armazenar hidrogênio reversivelmente, absorvendo e este reagente quando a bateria é carregada revertendo este processo quando for descarregada (LINDEN, 2002; REDDY, 2002).

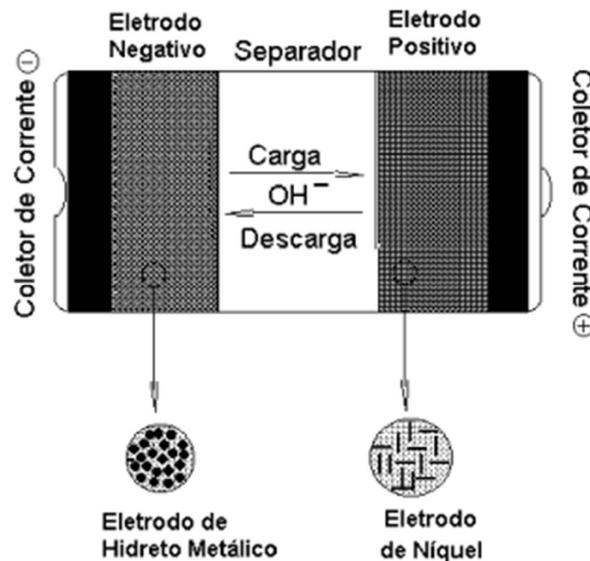


Figura 13 – Esquema de funcionamento eletrodos e separador para processos de carga e descarga em baterias NiMH.

Fonte: AMBROSIO, 2001

2.3.1.4 Baterias Lítio-Íon

O Lítio é o mais leve dos metais aplicados em baterias e apresenta características muito interessantes do ponto de vista eletroquímico, pois permite a utilização de tensões muito altas o que pode resultar em energia específica e potência muito altas (EHSANI et al., 2010).

Desde o anúncio da primeira bateria lítio-íon (Li-ion) em 1991, temos visto um aumento sem precedentes, e tem sido considerada a bateria recarregável mais promissora do futuro. Na aplicação de VE está bateria tem performance muito superior as demais já apresentadas pois possui: Ampla faixa de temperatura de

operação, vida útil elevada, baixo tempo de recarga, peso e volume bem reduzidos, custo razoável e não agride o meio ambiente (WESTBROOK, 2007).

A bateria Li-ion é uma bateria recarregável na qual os íons de lítio se movem entre o ânodo e cátodo, criando assim um fluxo de eletricidade. O lítio no ânodo (material de carbono) é ionizado e enviado para o eletrólito. Os íons de lítio se movem através de um separador plástico poroso para dentro do cátodo e ao mesmo tempo, elétrons são liberados do ânodo (ROSOLEM et al., 2012). A Figura 14 mostra o esquema de funcionamento das baterias Li-ion.

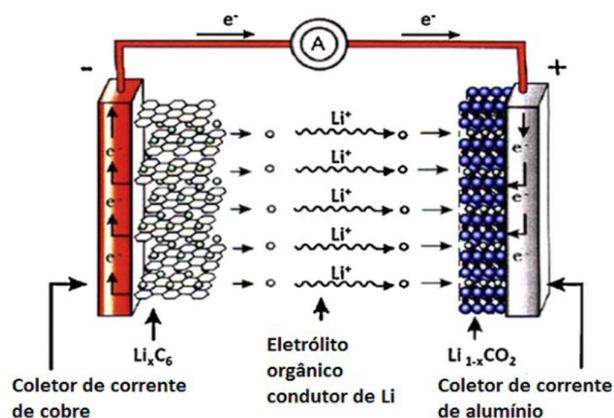
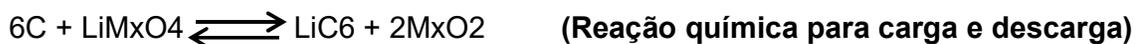


Figura 14 – Representação esquemática do funcionamento de uma bateria Li-ion.

Fonte: ROSOLEM et al., 2012

A equação a seguir demonstra as reações químicas durante os ciclos de carga e descarga das baterias de Li-íon.



Os materiais ativos no ânodo e cátodo, possuem compostos com grande propriedade de intercalação, possibilitando a inserção e extração de íons de lítios entre os dois eletrodos; e o íon de lítio não sofre degradação pelo processo de oxide-redução, esse processo de oxirredução acontece em outros materiais constituintes dos eletrodos (grafite, cobalto, manganês, ferrofosfato e etc) (ROSOLEM, et.al., 2012).

Nos primeiros ciclos de carga/descarga da bateria Li-íon ocorre uma decomposição do eletrólito o que acarreta a formação de uma camada protetora no eletrodo negativo, essa camada protege o eletrodo da incidência de decomposição durante a sua vida útil. No eletrodo positivo durante a carga e com potenciais mais

altos o eletrólito é reduzido gerando reações exotérmicas; ou seja, a bateria necessita operar em tensões inferiores a tensão limite de oxidação. Quando ocorre um sobrecarga, inevitavelmente o eletrólito é oxidado, o que provoca uma aceleração na ocorrência de falhas, em função da degradação dos materiais ativos nos eletrodos (ROSOLEM, et.al., 2012).

A proteção de segurança é um quesito que fundamental e mandatório na utilização das baterias Li-ion em VE, esses riscos ligados as baterias são gerenciados através de um sistema de gerenciamento de energia, esse sistema permite um uso seguro das células dentro de um banco de baterias (JULIEN, et.al,2016).

Esse sistema de gerenciamento é conhecido como BMS (Battery Management System), tem função de prevenir o risco agregado a todo sistema com riscos relacionados a controle de temperatura, danos mecânicos, e controle de estado de carga. Os problemas que podem acontecer caso tenham algum acidente são: liberação de eletrólito corrosivo, incêndio e até explosão (JULIEN, et.al,2016).

2.3.2 Ultracapacitores

Segundo Miller (2011), o ultracapacitor apesar de ter sido conceitualmente pensado no início do século XIX, teve uma patente que pôde ser comercialmente desenvolvida apenas em 1962 nos USA pela empresa SOHIO (Standard Oil Company Ohio) desenvolvido pelo químico Robert A. Rightmire e foi visto na época como um simples armazenador de energia elétrica. O ultracapacitor da empresa SOHIO partilhava do mesmo princípio de funcionamento do capacitor comum, onde tem-se duas placas condutoras separadas por um isolador. A Figura 15 demonstra um exemplo, onde uma tensão CC é conectada através do capacitor, sendo uma positiva e outra negativa; as cargas opostas se atraem e armazenam energia (LARMINIE, 2012; LOWRY, 2012).

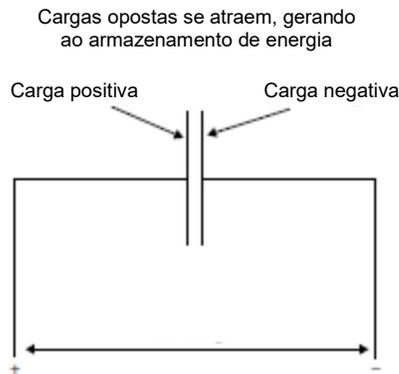


Figura 15 – Princípio de funcionamento do capacitor

Fonte: LARMINIE, 2012; LOWRY, 2012

A carga Q armazenada no capacitor com capacitância C Farads em uma tensão V , conforme equação 2.2 (LARMINIE, 2012; LOWRY, 2012):

$$Q = C \times V \quad (2.2)$$

Os ultracapacitores podem oferecer uma grande capacidade armazenamento de energia, embora a utilização em grande escala aconteça em circuitos eletrônicos que utilizam os capacitores com capacidade reduzida, temos visto ao longo dos últimos anos um início de utilização de ultracapacitores em VE. Esses capacitores utilizados em VE possuem grande área de placas separadas por um isolador proporcional as placas utilizadas (EHSANI et al., 2010). A energia armazenada em um ultracapacitor pode ser demonstrada na equação 2.3.

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.3)$$

Onde E é a energia armazenada em Joules e a capacitância C do ultracapacitor em farads é fornecida pela equação:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (2.4)$$

Nesta equação 2.4, temos ε que é a permissividade do material entre as placas, A é a área da placa e d é a distância de separação entre as placas.

O desempenho de um ultracapacitor pode ser representado pela tensão nos terminais durante os ciclos de carga e descarga com correntes diferentes. Existem três parâmetros em um ultracapacitor: Sua própria capacitância VC (*potencial elétrico*), a resistência em série RS e a resistência dielétrica RL , como mostrado na Figura 16 (EHSANI et al., 2010).

A tensão do ultracapacitor durante o ciclo de descarga pode ser expressa pela equação (2.5).

$$V_t = V_c - iR_s \quad (2.5)$$

O potencial elétrico de um ultracapacitor pode ser pela equação 2.6:

$$\frac{dV_c}{dt} = - \left(\frac{i+i_L}{C} \right) \quad (2.6)$$

Onde C é a capacitância do ultracapacitor, a corrente de fuga i_L pode ser expressa na equação (2.7).

$$i_L = \frac{V_c}{R_L} \quad (2.7)$$

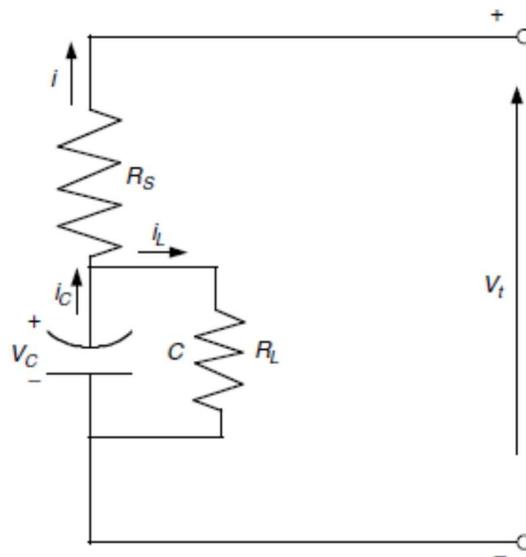


Figura 16 – Circuito equivalente Ultracapacitor

Fonte: EHSANI et al., 2010

Os ultracapacitores hoje estão presentes não somente em VE, estão em diversas aplicações como: acumulador de energia em sistemas de frenagem regenerativa, arranque em motores de combustão interna, fonte em sistemas de no breaks entre outras aplicações. Mas quando pensamos em aplicação específica em VE, temos sempre que considerar fatores como: Capacidade e tensão desejada; peso que o projeto permite e valores disponíveis para aquisição.

2.4 INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Segundo Franchi (2009) inversores de frequência são dispositivos de controle de velocidade de motores que permitem o controle preciso de velocidade e torque no motor, permitindo o controle com uma variação de no máximo 0,1%, independente da carga aplicada ao motor.

Existem dois tipos de acionamentos: os acionamentos de corrente contínua, denominados simplesmente de conversores CC, e os acionamentos de corrente alternada (CAPELLI, 2002).

Segundo Capelli (2002) por ser capaz de gerar tensão e frequência ajustáveis, um inversor de frequência é um dispositivo destinado a controlar a variação de velocidade de motores de indução trifásicos. Desta forma, os inversores são capazes de proporcionar um acionamento suave do motor, evitando eventuais quebras que podem ser produzidas por outros dispositivos que operem com variações não contínuas de torque. Ele também pode ser utilizado como dispositivo de segurança para problemas de sobrecarga, queda de tensão ou da rede elétrica.

Os inversores de frequência podem ser divididos basicamente em dois tipos: Inversor de frequência escalar e Inversor de frequência vetorial; sendo que o inversor escalar possui uma resposta mais lenta as solicitações, ou seja demoram a reagir a mudanças de torque e velocidade. O Inversor vetorial possui uma forma precisa e rápida de resposta ao torque exigido pela carga, desta forma permite a aplicação onde exige uma variação brusca de velocidade e carga (CERCAL et al., 2014).

2.5 MÁQUINAS ELÉTRICAS APLICADAS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

As máquinas elétricas são um componente chave na configuração de um veículo elétricos, pois fornecem potência e torque necessários para impulsionar o veículo, a máquina elétrica também pode funcionar como o processador do fluxo de energia no sentido inverso durante a regeneração da frenagem, passando a atuar como um gerador no processo que converte a energia mecânica da frenagem em energia elétrica. No processo em que a máquina elétrica converte energia elétrica para mecânica a máquina é considerada como um motor (HUSAIN, 2005).

Em veículos puramente elétricos (VE) o motor elétrico é a única unidade de propulsão, esse motor elétrico é quem gera a energia mecânica para que seja possível a tração do veículo, essa energia pode ser entregue diretamente nas rodas ou a uma transmissão, isso é definido conforme a configuração do VE. Quando comparado com um motor de combustão interna os motores elétricos destacam-se pela capacidade de entrega do torque total mesmo em baixas velocidades (HUSAIN, 2005).

O sistema de propulsão de um veículo elétrico, não consiste apenas em uma máquina elétrica; este sistema necessita de um controlador eletrônico e conversor de energia. O conversor de energia tem a função de entregar ao motor elétrico a tensão e corrente adequadas para seu funcionamento. O controlador eletrônico tem a função de comandar o conversor de energia, provendo sinais de controle e controlando o funcionamento do motor elétrico com objetivo de produzir torque e velocidade adequados ao projeto. A Escolha da configuração de um sistema de propulsão elétrico para um VE, depende de fatores como expectativa do condutor, restrições que o veículo poderá sofrer e fontes de energia que serão utilizadas. O fator expectativa do condutor pode ser definida como um perfil de condutor que é composto por: perfil de condução, aceleração e velocidade máxima esperada, capacidade de subir um determinado plano inclinado, autonomia e frenagem. A Figura 17 ilustra o diagrama de blocos funcional de um sistema de propulsão elétrica (EHSANI et al., 2010).

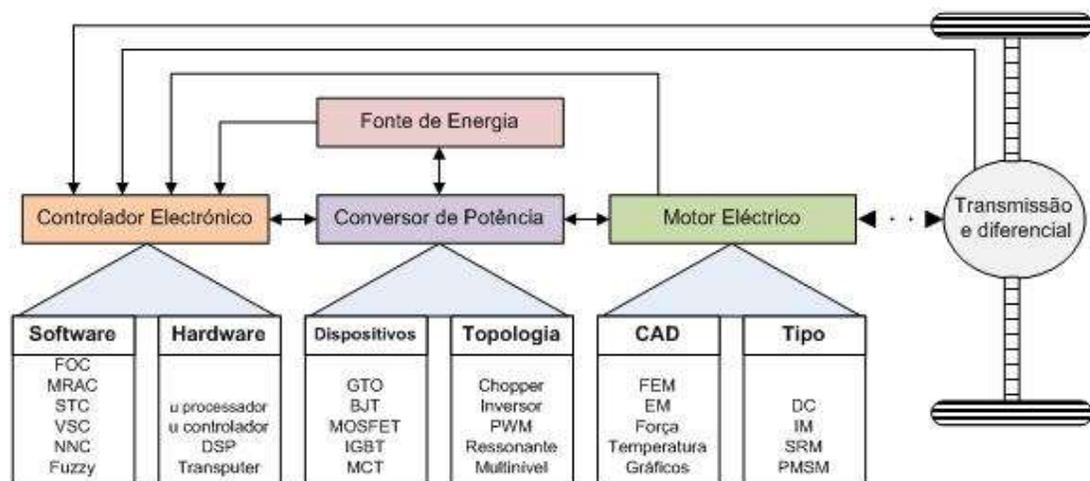


Figura 17 – Diagrama de blocos funcional de um sistema de propulsão elétrica

Fonte: EHSANI et al., 2010

De forma diferente dos motores utilizados na indústria, os motores utilizados em VE e VEH geralmente requerem arranques e paradas com muita frequência, altas taxas de aceleração / desaceleração, torque alto em subidas de baixa velocidade, baixo torque em alta velocidade em uma grande faixa de velocidade de operação. O acionamento dos motores utilizados em VE e VEH podem ser classificados em dois grupos principais: Motores com escova e Motores sem escova de comutação. A Figura 18 ilustra essa divisão.

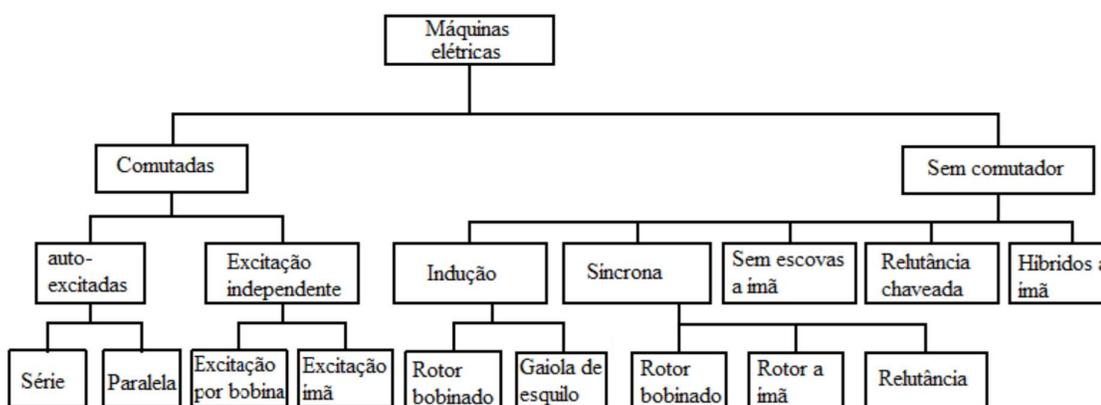


Figura 18 – Classificação de máquinas elétricas tracionárias aplicadas a VE e VEH

Fonte: EHSANI et al., 2010

Os motores de corrente contínua geralmente são motores com escovas com ligações: série, shunt, composta e excitação com imã permanente. Motores de corrente contínua precisam de escovas para alimentar a armadura, tornando-os menos confiáveis e inadequados para operação sem manutenção e alta velocidade. Os motores de CC tem ampla utilização em veículos elétricos, devido a sua tecnologia madura e controle simples (EHSANI et al., 2010).

Os recentes avanços tecnológicos têm levado os motores elétricos de CC sem comutação para outro patamar de utilização. As vantagens obtidas com esses avanços incluem: maior eficiência, maior densidade de potência, menor custo operacional, alta confiabilidade e isenção de manutenção (quando comparado com um motor CC com comutação); desta forma os motores elétricos CC sem comutação têm se tornado atraentes para aplicação em VE e VEH. Os motores de indução têm ampla aceitação na propulsão de VE e VEH, isso acontece por conta do seu baixo

custo, alta confiabilidade e operação sem manutenção. No entanto, os controles convencionais em motores de indução: frequência variável e tensão variável, podem não proporcionar o desempenho desejado. Com evolução da eletrônica de potência, utilização de microprocessadores no processamento digital de sinais, a utilização do princípio de controle orientado para o campo (*FOC*) ou controle de vetorial de motores de indução passou a ser adotada para superar a sua complexidade de controle devido a sua não linearidade. Os motores de indução aplicados em VE e VEH que utilizam o *FOC* sofrem com a baixa eficiência em baixas cargas e limitada faixa de operação (EHSANI et al., 2010).

Quando se tem a substituição do enrolamento de campo de motores síncronos convencionais, as escovas convencionais são eliminadas com a utilização de ímãs permanentes. Esses motores síncronos também são denominados motores brushless AC ou motores brushless com alimentação senoidal, por conta da sua configuração com corrente senoidal AC e sem escovas. Os motores síncronos podem ser alimentados a partir de uma forma de onda senoidal ou forma de onda pulsada através da modulação (*PWM*). Quando o ímã permanente é montado na superfície do rotor, esses tipos de máquina comportam-se como motores síncronos de polos não salientes, porque a permeabilidade do ímã permanente é semelhante a do ar. Ao inserir os ímãs permanentes dentro do circuito magnético do rotor, tem-se uma indução magnética produzida pelos ímãs que procuram um caminho de relutância reduzida nos dentes do estator e desta forma produzem um conjugado de relutância. Ao abandonar o enrolamento de campo ou os ímãs permanentes, tem-se uma saliência no rotor da máquina criando-se motores de relutância síncronos; estes tipos de máquina são geralmente simples e baratas, mas com potência de saída relativamente baixa (WILTUSCHNIG, 2016).

Similar aos motores de indução, estes motores síncronos com ímã permanente geralmente utilizam o controle vetorial de campo. Devida a sua elevada densidade de potência e alta eficiência, esses motores têm tido grande aceitação, pois possuem um elevado potencial para competir com os motores de indução na aplicação em VE e VEH (WILTUSCHNIG, 2016).

Quando temos a inversão de posição entre o estator e o rotor dos motores de corrente contínua com ímã permanente e escovas, automaticamente tem-se uma máquina de corrente contínua sem escovas produzida. Esses motores são alimentados por corrente alternada retangular e, portanto, também são conhecidos

como motores brushless (sem escovas) com alimentação trapezoidal. A maior vantagem destes motores é a remoção de escovas, outra vantagem é a capacidade de produzir um grande torque devido a interação entre corrente retangular da armadura e a forma de onda da indução magnética. Além disso, a configuração sem escova permite uma maior área transversal para os enrolamentos da armadura, como a condução de calor através da armadura é melhorada, um aumento na densidade de corrente provoca uma maior densidade de potência. Diferente dos motores síncronos com imã permanente, estes motores sem escovas geralmente operam com sensores de posição do eixo (EHSANI et al., 2010).

Motores de relutância chaveada têm sido reconhecidos como tendo um potencial considerável para aplicações em VE e VEH. Basicamente, eles são derivados direto de motores de passo único de relutância variável. Os motores de relutância chaveada possuem alguns diferenciais, como: construção simples, baixo custo de fabricação e excelentes características de torque para aplicação em VE e VEH. Embora possuam simplicidade na construção, isso não implica uma relativa simplicidade no que diz respeito a concepção e controle. Por conta da saturação na borda dos polos e pelo efeito dos harmônicos de alta frequência, o controle torna-se complexo. Tradicionalmente, os motores de relutância chaveada funcionam com sensores de eixo para detectar a posição relativa entre o rotor e o estator. Estes sensores são geralmente vulneráveis a impactos mecânicos e sensíveis a variação de temperatura e impregnação de poeira. Portanto, a presença do sensor de posição reduz a confiabilidade desses motores e os restringe a algumas aplicações (WILTUSCHNIG, 2016).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Durante a revisão bibliográfica foi realizada uma ampla pesquisa sobre as configurações de VE e VEH, entendemos que a configuração que adotamos para o desenvolvimento do nosso veículo protótipo é uma das configurações mais simples no que diz respeito a VE.

3.1 CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO

O veículo base utilizado no desenvolvimento do protótipo é uma Volkswagen Saveiro ano/modelo: 92/92, este veículo é originalmente um veículo de carga compacto com MCI que utiliza gasolina (E-22) como combustível, transmissão manual de 5 velocidades e tração no eixo dianteiro. A Figura 19, abaixo é um exemplar do veículo na sua configuração original.



Figura 19 – Volkswagen Saveiro

Fonte: Autor, 2017

Para a transformação do veículo convencional em um VE a configuração escolhida para ser utilizada no desenvolvimento do protótipo foi a seguinte:

Maquina elétrica: Motor WEG W22.

Caixa de Transmissão: 5 velocidades manual (Volkswagen).

Banco de baterias: 25 Baterias Chumbo Acido (Pb) ou 100 baterias Lítio-íon (Li-ion).

Inversor de frequência: WEG CFW-11.

A Figura 20 apresenta a configuração que adotamos para desenvolvimento deste trabalho.

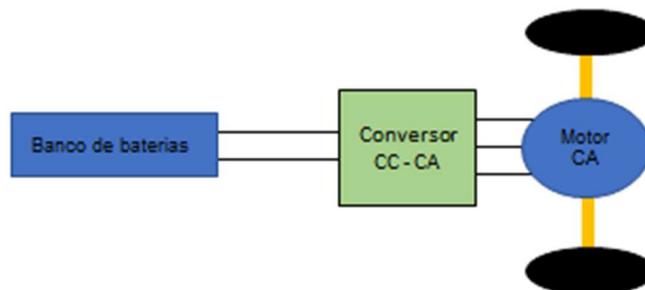


Figura 20 – Modelo de VE utilizado para desenvolvimento do protótipo

Fonte: EHSANI, 2010

Para a simulação, utilizamos os dados reais do veículo disponibilizados pela montadora do veículo base. A tabela 1, apresenta os principais parâmetros veículo original utilizado.

Tabela 1 – Dados básicos veículo Volkswagen Saveiro

Motor	
Instalação	Dianteiro
Taxa de compressão	9:1
Cilindradas	1555 cm ³
Potência	76 cv a 5600 rpm
Torque	13,3 kgfm a 3200 rpm
Dimensões	
Comprimento	4070 mm
Entre-eixos	2358 mm
Peso	900 kg
Capacidade de carga útil	580 kg
Largura	1622 mm
Altura	1368 mm
Pneus	175/70 R15
Suspensão	
Dianteira	Independente - Mc Pherson
Traseira	Eixo de torção

Fonte: Autor, 2017

3.1.1 Dados máquina elétrica adotada no protótipo

Para aplicação no veículo protótipo foi definida a máquina elétrica do fabricante WEG modelo W22 Premium; este modelo é uma máquina de indução com rotor gaiola, 25CV/18,5KW de potência, tensão nominal de operação 220/380V com aproximadamente 130kg. Este modelo foi escolhido dado as suas características técnicas tais como: Alto rendimento conforme padrões estabelecidos na norma NBR 17094 e capacidade de fornecer um rendimento praticamente constante na faixa entre 75% a 100% da carga nominal. Na Figura 21, podemos perceber que seu rendimento não sofre alterações consideráveis, o que garante elevados níveis de eficiência energética e menores custos de operação.

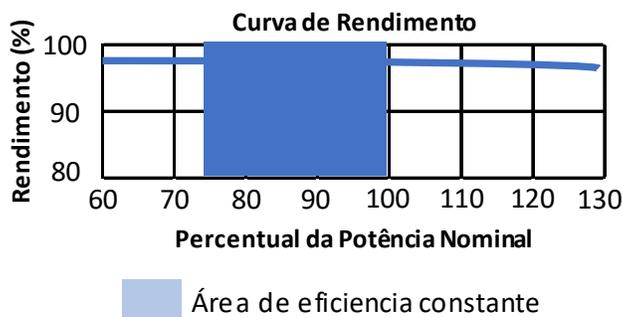
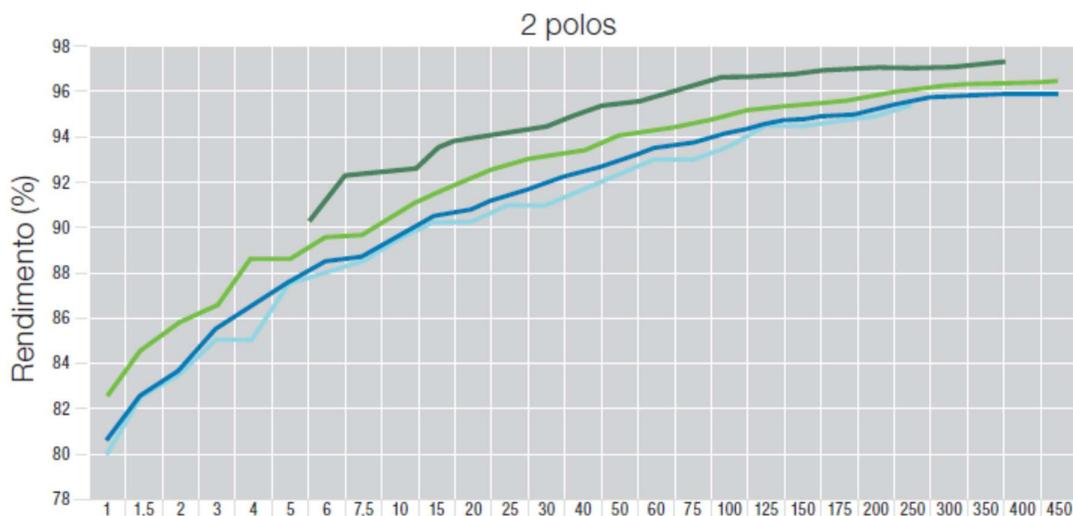


Figura 21 – Curva de rendimento X Potencia nominal para motor WEG W22

Fonte: MANUAL WEG W22, 2016



■ W22 IR3 Premium

Figura 22 – Curva de Rendimento especifica para motor WEG W22 com 25cv

Fonte: MANUAL WEG W22, 2016

Este modelo de motor com 2 polos possui um rendimento específico em plena carga de 92,8% conforme Figura 22.

Principais características de construção do motor que escolhemos para o veículo em desenvolvimento são:

- 1) Caixa de ligação: Possui um espaço interno que permite grande flexibilidade no manuseio e conexão dos cabos de ligação, permitindo acoplamento de caixa auxiliar e instalação de acessórios.
- 2) Anéis de fixação dos mancais: Possui estrutura reforçada, superfície aletada que permite melhor dissipação de calor nos mancais e

alojamento do rolamento projetado para fora que permite melhor dissipação do calor.

- 3) Tampas dianteira e traseira: Design de aletas que otimizam a dissipação de calor através do fluxo de ar no motor e redução dos níveis ruído. Estrutura robusta que evita a deformação da máquina.
- 4) Carcaça: Olhais de içamento, locais específicos para o posicionamento de sensores de vibração.
- 5) Sistema de ventilação: Tampa defletora e ventilador com estrutura reforçada e baixo nível de ruído e o que proporciona maior eficiência par ao sistema de ventilação.

A Figura 23, ilustra as características citadas acima.

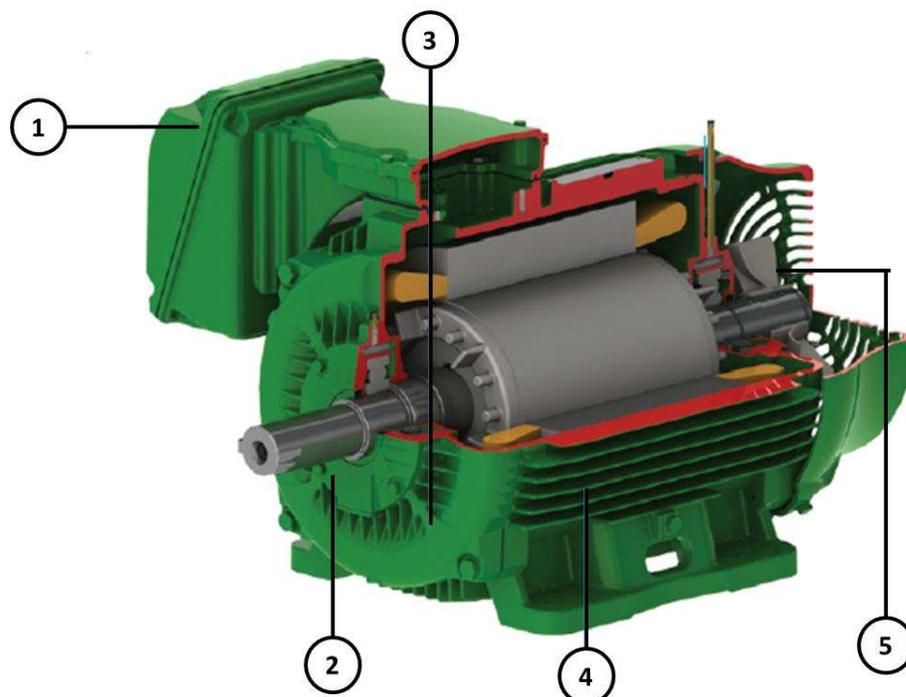


Figura 23 – Principais componentes da máquina elétrica estudada

Fonte: MANUAL WEG W22, 2016

3.1.2 Modelagem das propostas de banco de baterias

Os modelos propostos neste trabalho são baseados em baterias com características de baterias Chumbo Ácido (Pb) e baterias de Lítio - íon (Li-ion), a

criação dos modelos tem como objetivo prever o desempenho de cada uma das opções propostas, considerando as variáveis: máquina elétrica adotada no projeto do veículo, tipo de veículo, ciclo de rodagem adotado como referência e etc.

Os modelos propostos neste trabalho são baseados no circuito equivalente apresentado na Figura 24.

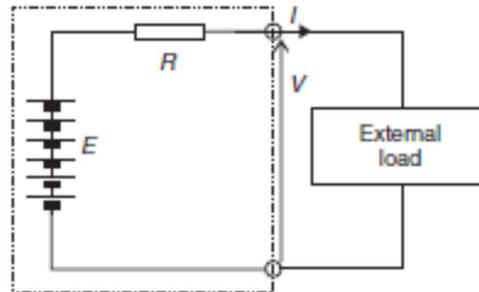


Figura 24 – Circuito equivalente para modelagem de baterias

Fonte: LARMINIE, 2012; LOWRY, 2012

No circuito equivalente da Figura 24, temos os seguintes componentes: E é a tensão de circuito aberto, R é a resistência interna, I é a corrente e V é a tensão de alimentação. Este circuito apresenta valores de E e R não constantes. A seguir estão a descrição e equações referentes a cada componente do circuito equivalente adotado.

A tensão no circuito aberto é o primeiro parâmetro a ser estabelecido, pois esta tensão é diferente para cada um dos dois tipos de baterias propostos; esta variação de tensão se dá em função do número de células “ n ” e da profundidade de carga DoD . A tensão para baterias chumbo ácido esta expressa na equação 3.1, nesta equação foi considerado que DoD é 0 para bateria carregada e 1 para bateria descarregada (KROEZE, 2008; LARMINIE, 2012; LOWRY, 2012)

$$E = n \times (2,15 - DoD \cdot (2,15 - 2,00)) \quad (3.1)$$

O estado de carga SoC é apresentado como a capacidade atual da bateria, e pode ser entendido como a diferença da máxima carga possível na bateria (100%) e a descarga considerada. Para efeito de cálculos na simulação neste trabalho, consideramos uma bateria carregada apresenta SoC de 100% e totalmente descarregada um SoC de 0%. A equação 3.2 apresenta o estado de carga SoC .

$$SoC = 1 - DoD \quad (3.2)$$

Para as baterias de Lítio-ion a tensão E varia em função do estado de carga da bateria SoC a equação 3.3 apresenta a tensão no circuito para este tipo de bateria (KROEZE, 2008).

$$E = n \times \left(-108,97 \times SoC^6 + 355,88 \times SoC^5 - 453,64 \times SoC^4 + 284,33 \times SoC^3 - 90,038 \times SoC^2 + 13,433 \times SoC + 3 \right) \quad (3.3)$$

A resistência interna R para baterias chumbo ácido é considerada constante e para as baterias Lítio-ion tem variação em função do estado de carga SoC e é apresentada na equação 3.4 (KROEZE, 2008).

$$R = n \times \left(-0,049 \times SoC^5 - 0,1297 \times SoC^4 + 0,4965 \times SoC^3 - 0,4577 \times SoC^2 + 0,144 \times SoC^1 + 0,0482 \right) \quad (3.4)$$

A capacidade da bateria é calculada pela capacidade de Peukert, onde o coeficiente K de Peukert tem um valor diferente para cada tipo de banco de baterias. A expressão 3.5 representa a capacidade de Peukert (LARMINIE, 2012; LOWRY, 2012)

$$C_p = I_{BT}^K \times t \quad (3.5)$$

C_p é a capacidade de Peukert, K é o coeficiente de Peukert, I_{BT} é a corrente requerida pela bateria e t é o tempo.

A tensão de alimentação V para ambos tipos de baterias é definida pela equação 3.6.

$$V_{BT} = E - R \times I \quad (3.6)$$

A potência requerida em ambas configurações de baterias pode ser definida pela equação 3.7, que é o produto da tensão V pela corrente I .

$$P = V \times I \quad (3.7)$$

E por último, temos a definição da corrente requerida na bateria, essa corrente pode ser expressa pela equação 3.8.

$$I = \frac{-E + \sqrt{E^2 + 4 \times R \times P}}{2 \times R} \quad (3.8)$$

A modelagem do banco de baterias é uma etapa muito importante dentro da concepção de projeto de veículo puramente elétrico, pois seu correto dimensionamento implica de forma significativa, em parâmetros importantes do veículo como peso e volume ocupado. Acima foram apresentados os modelos de baterias propostos que serão simulados considerando a proposta de VE apresentada neste trabalho.

3.1.3 Características Inversor de frequência

O modelo de inversor utilizado no protótipo desenvolvido é um equipamento do fabricante WEG modelo CFW-11, este modelo tem uma excelente performance no controle de velocidade e torque de motores de indução trifásico. Este modelo foi escolhido devido a sua grande versatilidade e inúmeras possibilidades com as suas funções disponíveis, além disso é um modelo que utiliza o conceito “plug and play” este inversor quando conectado a um motor WEG é facilmente configurado através da HMI (Human Interface Machine) – Interface Homem Máquina. A Figura 25 ilustra o modelo utilizado no desenvolvimento do protótipo (MANUAL CFW11, 2016).



Figura 25 – Inversor de frequência WEG CFW 11

Fonte: MANUAL CFW11, 2016

O modelo utilizado tem alimentação de monofásica ou trifásica em 200/240v, como uma faixa de potência de operação que varia entre 1 a 40 cv, com possibilidade de escolha do tipo de controle do motor (vetorial ou escalar) (MANUAL CFW11, 2016).

3.2 CICLOS DE CONDUÇÃO

Segundo Nesamani e Subramanian (2011) ciclo de condução é uma sequência de condições de operação (marcha lenta, aceleração, desaceleração, distancia, tempo de condução, frequência da das partidas e paradas), desenvolvida para representar um padrão típico de condução em uma região se aproximando da realidade, sendo amplamente utilizado em estudos de emissões veiculares.

No Brasil o ciclo de condução adotado para determinação de várias emissões em veículos leves e comerciais leves, entre as quais o CO₂, é o ciclo americano conhecido como FTP-75 (Federal Test Procedure 75). Os procedimentos relativos a este ensaio são descritos na Norma Brasileira (NBR 6601), mesmo sendo regulamentado pela ABNT este ciclo não reflete as condições das estradas brasileiras que possuem uma topografia muito acidentada e condições climáticas diversas. Existem outros ciclos de testes empregados no mundo: o Europeu (NEDC - New European Drive Cycle), o Japonês e o Americano (CAFE - Corporate Average Fuel Economy).

Para cada tipo de ciclo de condução foram desenvolvidas curvas que representam o ciclo de condução; essas curvas apresentam os perfis de velocidade em determinadas aplicações e são utilizadas para verificar o desempenho do veículo nessas situações. Tais curvas de ciclo de condução foram originalmente desenvolvidas para veículos com MCI e para verificar entre outros parâmetros, o consumo de combustível e a emissão de poluentes. Para os VE, essas curvas são utilizadas, principalmente, para verificar o desempenho quanto à demanda de potência e consumo de energia (TANAKA, 2013)

Quando consideramos veículos com MCI ou VEH, a energia consumida pode ser obtida através da medição do consumo de combustível. Para VE e veículos que fazem uso de uma fonte de energia externa, a energia absorvida dessa fonte é contabilizada.

Os principais ciclos de condução utilizados no mundo são os seguintes: europeu, americano e japonês.

3.2.1 Ciclos de condução Europeus

Estes ciclos de condução são ciclos teóricos, ou seja, não traduzem o que efetivamente se passa na realidade. Algumas partes do ciclo são feitas a velocidade constante. Devido ao facto de estes ciclos não reproduzirem a realidade, foram desenvolvidos um grupo suplementar de ciclos, os quais são designados por “HYZEM Cycles”. Os principais ciclos de condução europeu são: ECE 15, EUDC, EUDCL, NEDC, ARTEMIS, HYZEM.

3.2.1.1 ECE 15

O ciclo ECE 15 representa basicamente uma condução urbana que tem como principal característica, baixa velocidade do veículo (velocidade máxima 50km/h) e uma baixa carga no motor.

A Figura 26, representa o ciclo.

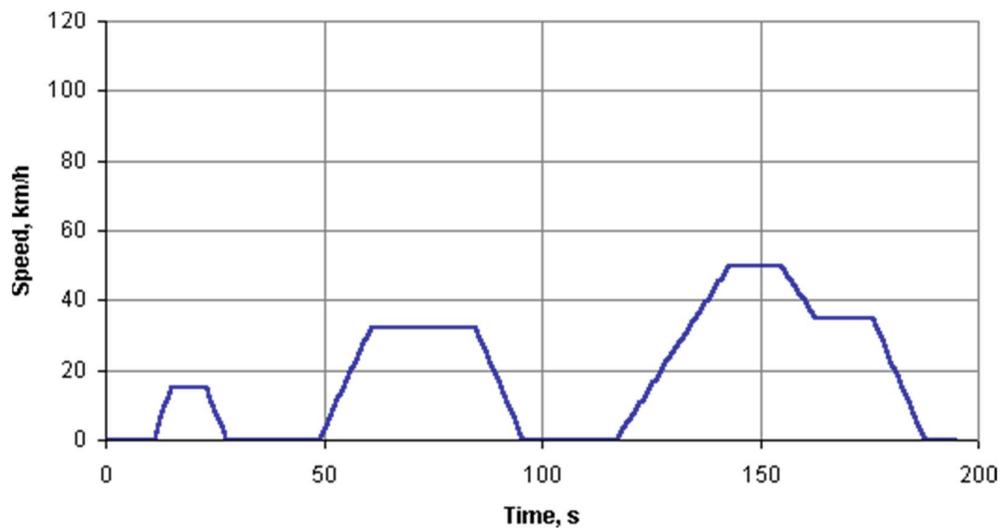


Figura 26 – Ciclo ECE 15

Fonte: Autor, 2017

3.2.1.2 EUDC

Este ciclo caracteriza-se por descrever uma rotina de estradas urbanas com velocidades medias entre 50km/h e 60km/h e no final chega-se a um pico de

velocidade de 120km/h. A velocidade e aceleração neste ciclo são superiores ao ECE. A Figura 27 demonstra o comportamento deste ciclo.

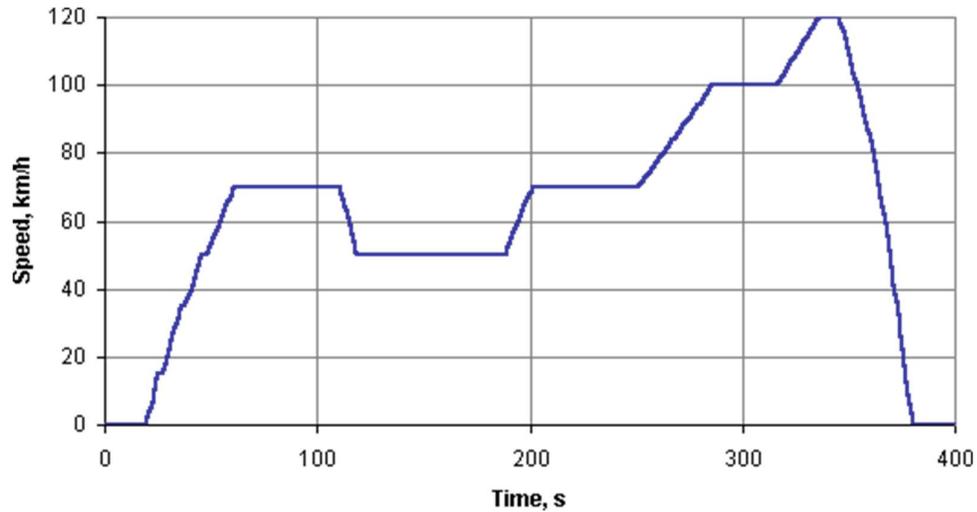


Figura 27 – Ciclo EUDC

Fonte: Autor, 2017

3.2.1.3 EUDCL

É um ciclo similar ao EUDC, porém foi especificado para utilização em veículos de baixa potência, pois possui um pico de velocidade de 90km/h. A Figura 28, demonstra o comportamento descrito anteriormente.

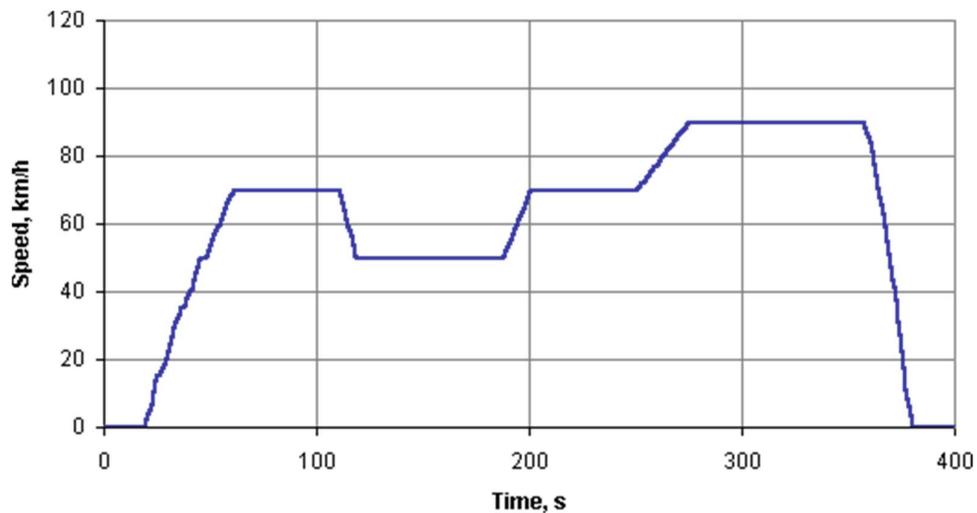


Figura 28 – Ciclo EUDCL

Fonte: Autor, 2017

3.2.1.4 NEDC – New European Drive Cycle

Este ciclo pode ser descrito como um ciclo combinado, que basicamente é uma combinação entre quatro ciclos ECE 15, seguido por um ciclo EUDC ou EUDCL.

Este ciclo tem sido amplamente utilizado para teste em VE. A Figura 29 mostra o ciclo descrito acima.

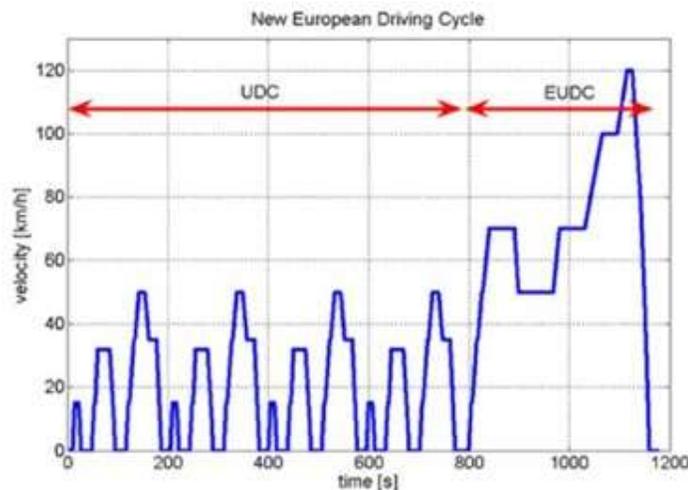


Figura 29 – Ciclo NEDC

Fonte: Autor, 2017

3.2.1.5 ARTEMIS

Pode ser definido como ciclo que se baseia em um estudo estatístico feito na Europa dentro do chamado projeto ARTEMIS. É feito de três configurações distintas, além de uma variante adicional: ciclo urbano, rural, o rodoviário, sendo que este último pode possuir dois picos de velocidade 130 km/h e 150 km/h.

3.2.1.6 HYZEM

Os demais ciclos mencionados acima, são ciclos que não representam os padrões reais de condução. Os ciclos HYZEM são transientes, ou seja, representam mais fielmente os ciclos de condução reais. As partes em que a velocidade é constante são muito menores do que nos ciclos modais. Os ciclos HYZEM são

derivados de padrões reais de condução em toda a Europa. Portanto, eles são uma melhor representação para as condições de condução do que os ciclos de padrão europeu. Os ciclos HYZEM são frequentemente utilizados, mas não são oficiais. Os ciclos HYZEM consistem em um ciclo urbano, um ciclo fora de estrada e um ciclo de autoestrada.

3.2.2 Ciclos de condução Norte Americanos

Esses ciclos de condução assim como o ciclo HYZEM, são ciclos que se assemelham com os reais padrões de condução veicular. Os principais ciclos de condução americano são: FTP 72, SFUDS, FTP - 75, HWFET, LA 92, NYCC, US 06

3.2.2.1 FTP 72

Ciclo desenvolvido com objetivo de descrever uma rota urbana com velocidade máxima de 91.2km/h ou 56.7mi/h, por se tratar de um ciclo urbano a velocidade média é de 31.5km/h. O FTP 72, pode ser chamado de FUDS, UDDS ou LA-4. A Figura 30, demonstra o ciclo FTP 72.

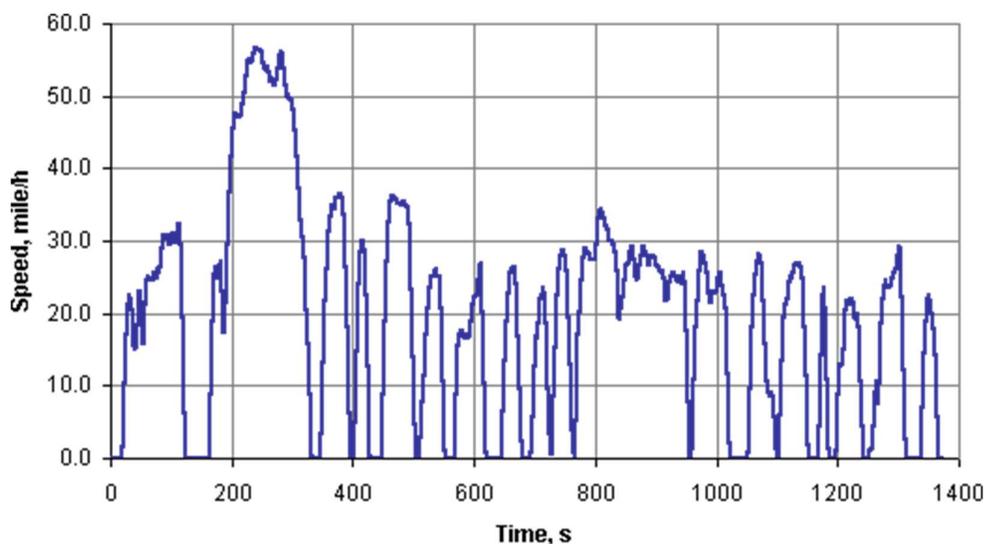


Figura 30 – Ciclo FTP – 72

Fonte: Autor, 2017

3.2.2.2 SFUDS

O ciclo SFUDS foi desenvolvido para simular descarga e carga de baterias durante uma viagem com um veículo elétrico. Foi concebido para um veículo específico com propulsão elétrica de eixo dual aperfeiçoado. O perfil de velocidade é adaptado para esse veículo para obter-se um perfil de descarga e carga que consistem em fases de potência constante.

3.2.2.3 FTP – 75

O FTP – 75 é utilizado para certificação de emissões e testes de economia de combustível de veículos leves nos Estados Unidos. O FTP – 75 é o FTP 72 com a adição de uma fase, essa fase é idêntica a primeira fase, mas é realizada com motor quente. A Figura 31, demonstra este ciclo.

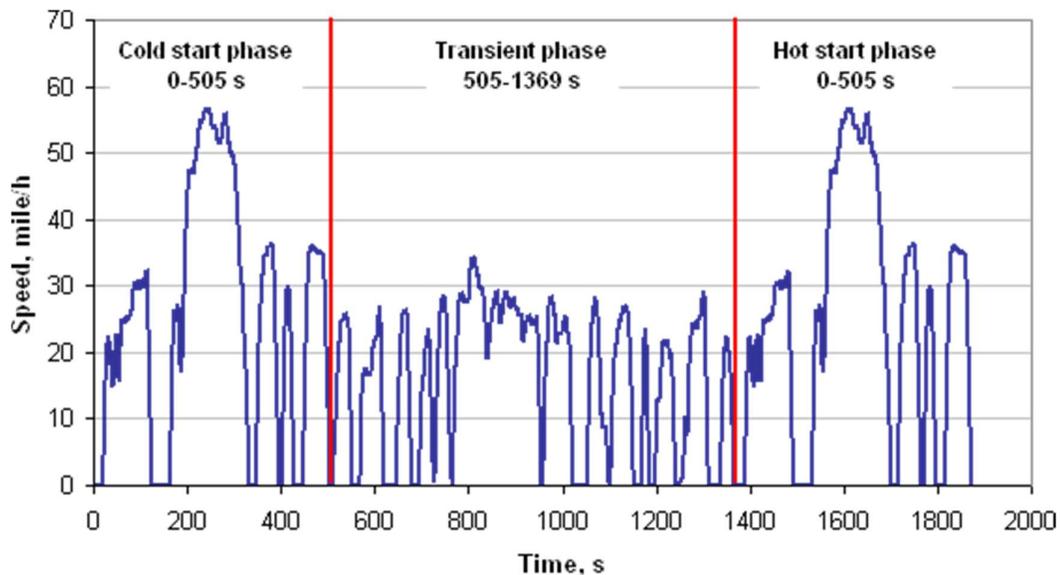


Figura 31 – Ciclo de condução FTP – 75

Fonte: Autor, 2017

3.2.2.4 HWFET – Highway Fuel Economy Test

Este ciclo de condução geralmente é aplicado para avaliar a economia de combustível em rodovias.

3.2.2.5 LA 92

Este ciclo, assim como o ciclo FTP 72 representa um percurso urbano. O referido ciclo foi desenvolvido em 1992, com o objetivo de substituir o ciclo FTP 72, o qual se tinha tornado um ciclo irrealista na representação dos parâmetros modernos de condução urbana, ou seja, o ciclo LA 92 apresenta uma velocidade média mais elevada e acelerações mais vigorosas que o ciclo FTP 72.

3.2.2.6 NYCC

O ciclo NYCC representa um circuito na cidade de Nova York. Tem muitas paradas e apresenta velocidades médias e máximas baixas.

A Figura 32, exemplifica o ciclo de condução NYCC.

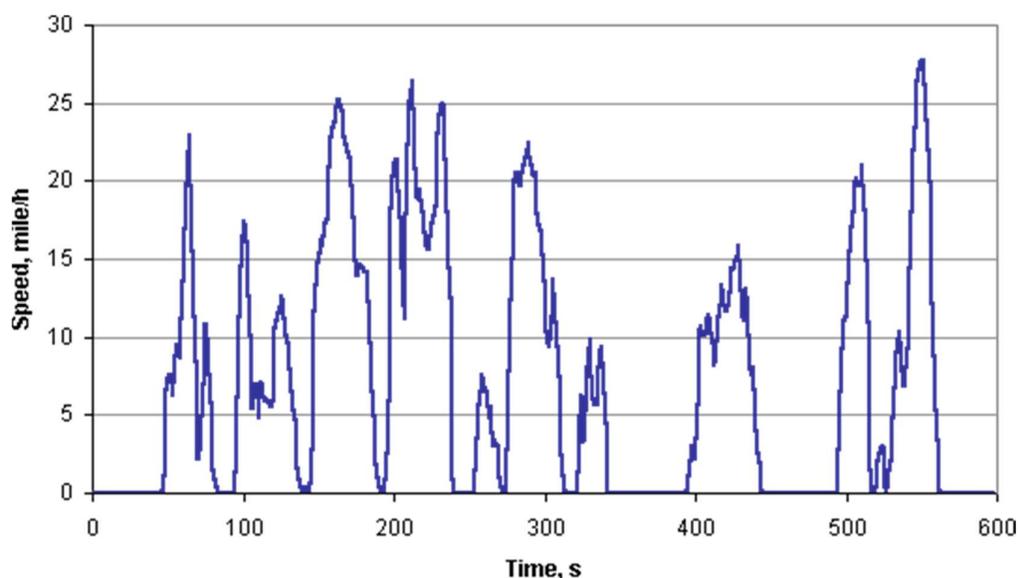


Figura 32 – Ciclo de condução NYCC

Fonte: Autor, 2017

3.2.2.7 US 06

O US 06 é considerado um ciclo de condução agressivo; pois trata-se de um complemento ao que está em falta no ciclo FTP 75, já que este não contempla a condução em rodovia. Este representa uma condução com cargas elevadas do

motor. Este ciclo tem uma velocidade máxima mais elevada, 130 km/h, e etapas de maior aceleração que representa um comportamento de condução muito mais agressivo. A figura 33 representa este ciclo de condução.

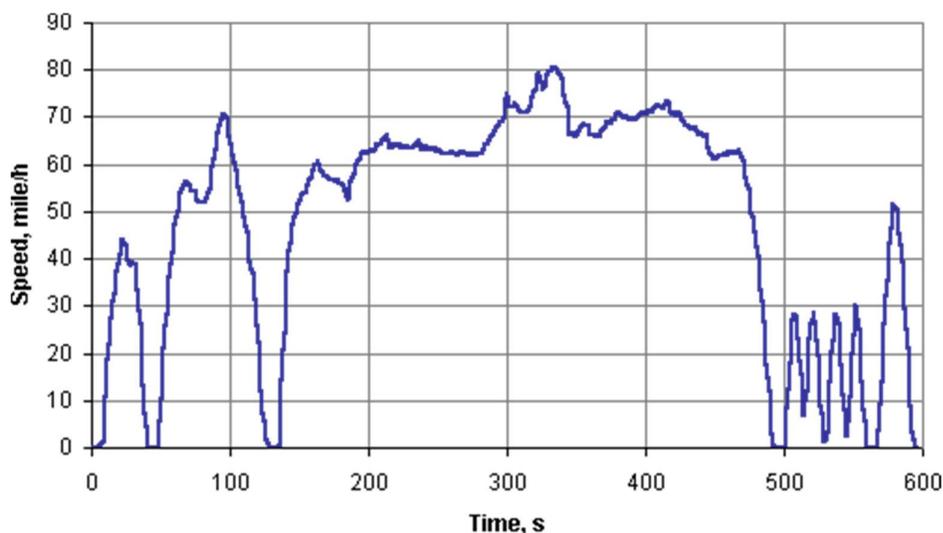


Figura 33 – Ciclo de condução US 06

Fonte: Autor, 2017

3.2.3 Ciclos de condução Japoneses

Os ciclos de condução japoneses são do tipo de ciclos teóricos e são constituídos por um ciclo urbano (10 Mode), por um ciclo rodoviário (15 Mode) e por um ciclo combinado que se inicia com o ciclo 15 Mode, seguido de três ciclos 10 Mode e termina outra vez com um ciclo 15 Mode, este designa-se por 10-15 Mode (ARAÚJO, 2015)

A figura 34, demonstra o ciclo 10-15 Mode, sendo que nesta figura não aparece o primeiro ciclo 15 Mode.

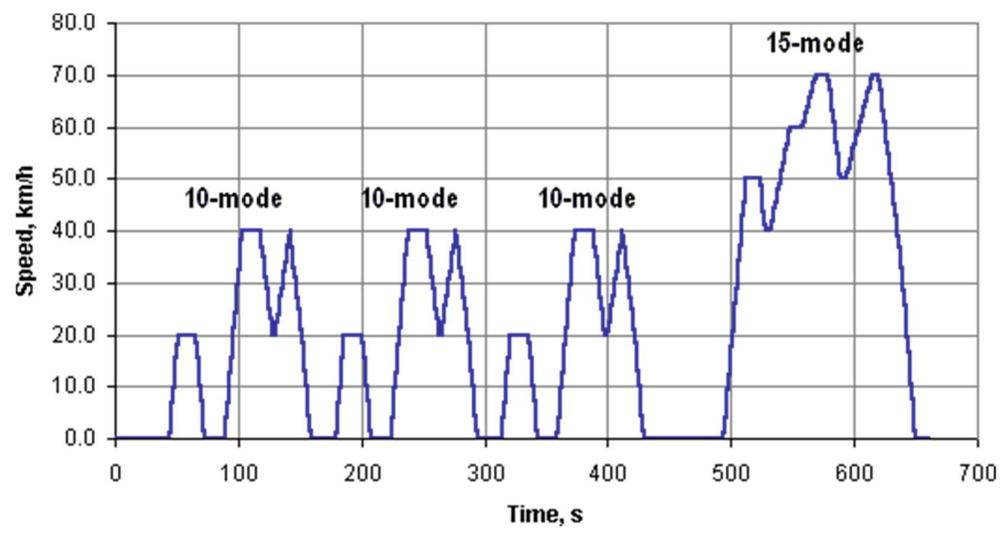


Figura 34 – Ciclo 10-15 Mode
Fonte: AUTOR, 2017

4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DOS MODELOS PROPOSTOS

Para o desenvolvimento deste capítulo, utilizamos as informações descritas no capítulo anterior para realizar as simulações no software ADVISOR (*Advanced Vehicle Simulator*) e através das simulações validar as duas propostas de implementação de banco de baterias para o VE, as três opções de relação de transmissão e os três ciclos de condução propostos para o experimento.

4.1 SOFTWARE ADVISOR – ADVANCED VEHICLE SIMULATOR

O ADVISOR é um software de simulação de veículos que possibilita simulações de diversas arquiteturas veiculares, entre as possibilidades de simulação estão: VE, VEH e Veículos Elétricos Híbridos com células de combustível (hidrogênio). O software foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos - NREL (*National Renewable Energy Laboratory*). Foi projetado para ser uma ferramenta de análise para auxiliar o Departamento de Energia dos Estados Unidos – DOE (*Department of Energy*) no desenvolvimento de tecnologias para VE e VEH em conjunto com as principais montadoras norte americanas Ford, General Motors e Daimler Chrysler. O principal objetivo do ADVISOR é possibilitar a comparação entre os modelos simulados, proporcionando análises dos seus componentes e o seu impacto no desempenho e consumo de combustível (MARKEL, et al., 2002)

O perfil de usuários do ADVISOR é de 68% indústria automotiva, 29% pesquisadores de universidades e comunidade acadêmica em geral e os últimos 3% são de órgãos governamentais.

O ADVISOR foi criado no ambiente MATLAB/SIMULINK, por conta do MATLAB fornecer um ambiente de programação baseado em matrizes o que torna possível a realização de cálculos sem muita complexidade e o SIMULINK é utilizado para representar sistemas complexos utilizado a forma gráfica.

No ADVISOR temos três telas de interface gráfica com o usuário – GUI (*Graphical User Interface*), essas telas são utilizadas para orientar o usuário durante o processo de simulação. Com as telas o usuário pode avaliar de forma interativa os impactos dos parâmetros do veículo e os requisitos do ciclo de condução no

desempenho do veículo, na economia de combustível e seus níveis de emissões. Na figura 42 temos um exemplo de tela utilizada no ADVISOR.

O modelo do veículo é representado graficamente usando os diagramas de bloco do SIMULINK que permite a definição das conexões entre os componentes de forma intuitiva. Os modelos definidos no SIMULINK leem os dados de entrada escritos no MATLAB durante a simulação e exibe os resultados na área de trabalho do MATLAB que por último disponibiliza esses resultados em uma tela do ADVISOR.

A figura 43 mostra um diagrama de blocos para um modelo de veículo puramente elétrico.

4.2 CICLOS DE CONDUÇÃO UTILIZADOS NO ADVISOR

Para a simulação dos modelos propostos na pesquisa, foram utilizados para o teste de consumo de energia 3 ciclos de condução, sendo 1 ciclo norte-americano (FTP – 72) e 2 ciclos construídos a partir de dados coletados em condições reais de rodagem em estradas norte americanas. A partir dos 3 ciclos escolhidos, foi estabelecida uma relação entre esses ciclos e rotas pré-estabelecidas na região do Vale do Paraíba Paulista.

4.2.1 Rota São José dos Campos X Caçapava – Cleveland

Essa rota foi baseada no ciclo de condução *Cleveland*, que é um ciclo de condução baseado em uma rodovia e apresenta velocidade média de 93,14 km/h e velocidade máxima de 161,63 km/h, temperatura ambiente de 20°C e nenhuma elevação de pista. Com essas características o ciclo Cleveland é apresentado na figura 35, pode ser relacionado com a rota São José dos Campos X Caçapava utilizando a rodovia estadual Governador Carvalho Pinto, esta rodovia possui excelentes condições de rodagem o que permite desenvolver velocidades máximas acima de 100 km/h.. Essa rota é ilustrada na figura 36.

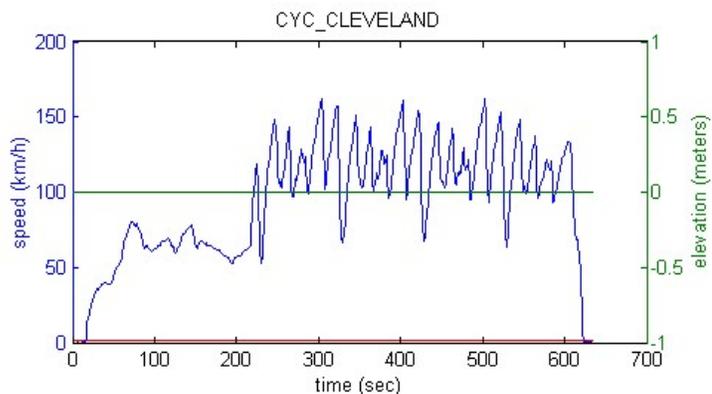


Figura 35 – Ciclo de condução Cleveland

Fonte: Autor, 2017

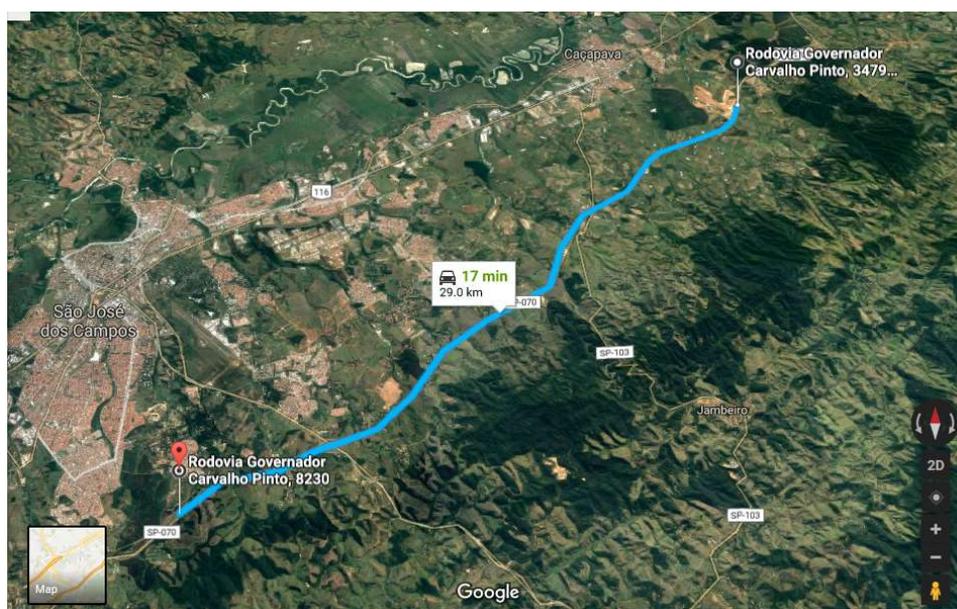


Figura 36 – Rota São José dos Campos X Caçapava

Fonte: Autor, 2017

4.2.2 Rota Tremembé X Capivari – VAIL2NREL

A rota de Tremembé para Capivari foi baseada no ciclo de condução *VAIL2NREL*, que é um ciclo de condução desenvolvido após uma aquisição de dados realizada em uma viagem com subida de serra com elevação de altitude de aproximadamente 700m na altitude a partir do seu ponto inicial conforme figura 37. Esse ciclo de condução apresenta velocidade média de 84,7 km/h e máxima de 121,7 km/h.

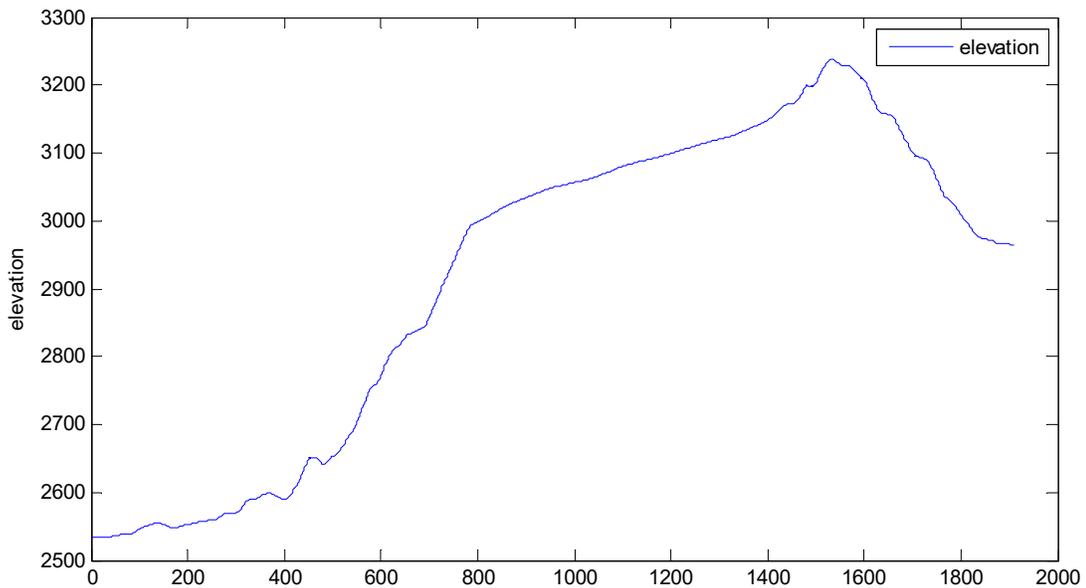


Figura 37 – Nível de elevação no ciclo de condução *VAIL2NREL*

Fonte: Autor, 2017

Com essas características o ciclo *VAIL2NREL* pode ser relacionado com a rota entre as cidades de Tremembé e Capivari utilizando a Rodovia Floriano Rodrigues Pinheiro, essa rodovia possui boas condições de conservação. A cidade de Capivari encontra-se a aproximadamente a 1800m acima do nível do mar. O ciclo *VAIL2NREL* é apresentado na figura 38 e a rota Tremembé X Capivari é demonstrada na figura 40.

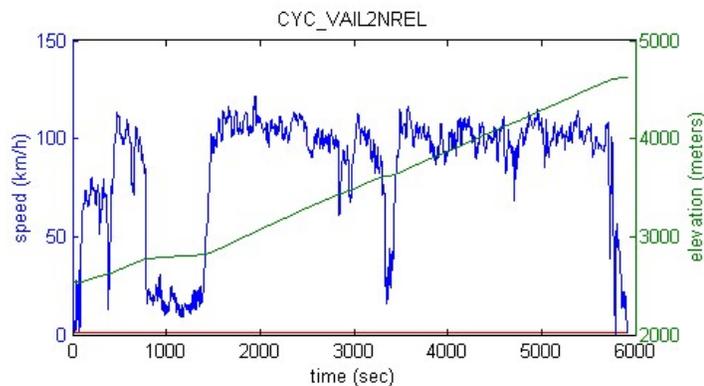


Figura 38 – Ciclo de condução *VAIL2NREL*

Fonte: Autor, 2017

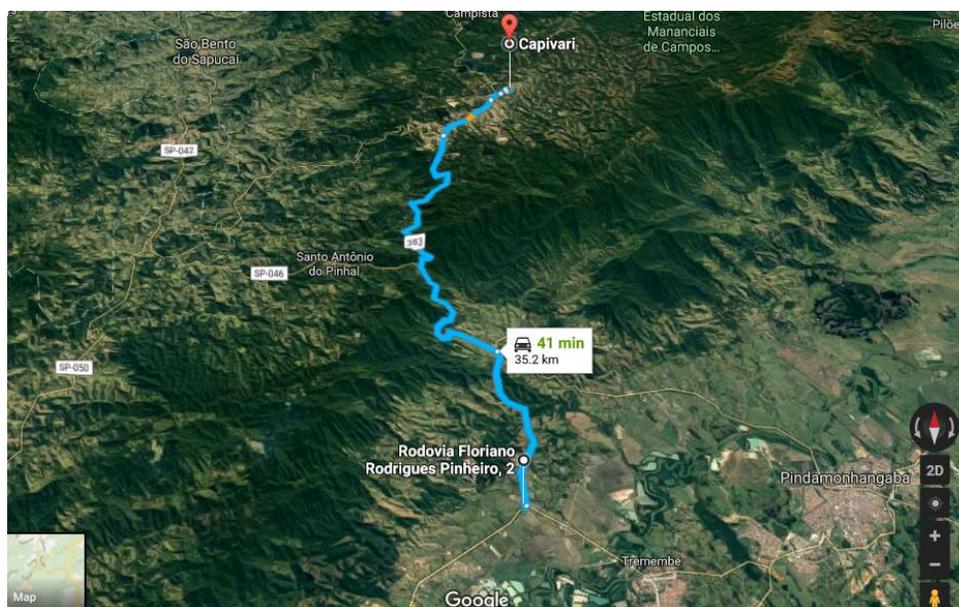


Figura 39 – Rota Tremembé X Capivari

Fonte: Autor, 2017

4.2.3 Rota Taubaté X Tremembé – FTP - 72

Essa rota foi baseada no ciclo de condução FTP – 72 que é um ciclo norte americano com característica urbana, possui velocidade média de 31,5 km/h e velocidade máxima de 91,2 km/h; e diversas paradas ao longo do percurso. Conforme essas características urbanas atribuídas a este ciclo foi possível relacioná-lo com a rota urbana entre as cidades de Taubaté e Tremembé. O ciclo FTP – 72 é apresentado na figura 30 e a rota urbana entre as cidades é apresentada na figura 40.

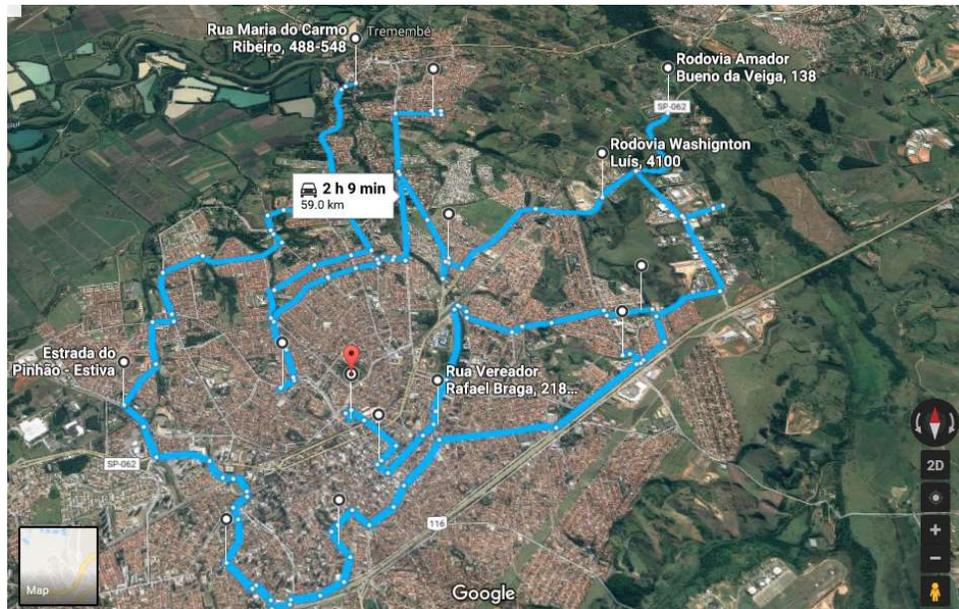


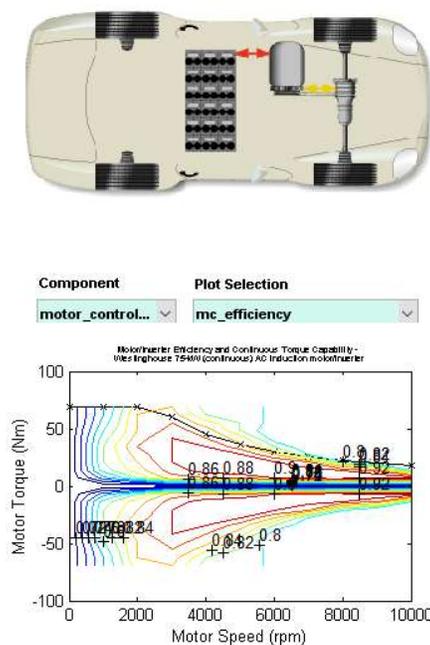
Figura 40 – Rota Taubaté X Tremembé

Fonte: Autor, 2017

4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM O SOFTWARE ADVISOR

As simulações consideram um modelo com características similares ao veículo protótipo em desenvolvimento, modificamos alguns parâmetros originalmente propostos no software ADVISOR. Essas alterações estão destacadas na figura 41.

Vehicle Input



Drivetrain Config				Auto-Size		
	EV version	type		max pwr (kW)	peak eff	mass (kg)
Vehicle	?	VEH_smallTruck				971
Fuel Converter	?	fc options				
Exhaust Aftertreat	?	EX_CI				
Energy Storage	rint	pb	ESS_PB25	25	308	275
Energy Storage 2	?	ess 2 options				
Motor	?	MC_AC75		19	0.92	23
Motor 2	?	motor 2 options				
Starter	?	starter options				
Generator	?	gc options				
Transmission	man	man	TX_5SPD_IDEAL			1 114
Transmission 2	?	trans 2 options				
Clutch/Torq. Conv.	?	clutch/torque converte...				
Torque Coupling	?	TC_DUMMY				
Wheel/Axle	Crr	Crr	WH_SMCAR			0
Accessory	Co...	Const	ACC_CONV			
Acc Electrical	?	acc elec options				
Powertrain Control	ev	man	PTC_EV			

front wheel drive rear wheel drive four wheel drive

View Block Diagram BD_EV

Variable List:

Component	Variables
motor_controller	mc_area_scale
	1

Scale Components

max pwr (kW)	peak eff	mass (kg)
25	308	275
19	0.92	23
1		114
		0

Calculated Mass: 1583

override mass: 1

Save Help Back Continue

Figura 41 – Tela de dados de entrada para veículo puramente elétrico

Fonte: Autor, 2017

O primeiro parâmetro modificado foi o modelo de máquina elétrica utilizada (Motor). Originalmente a máquina Westinghouse é modelada com 75kw, para a nossa simulação modificamos este parâmetro para 19kw aproximando da potência utilizada na máquina WEG que adotamos no desenvolvimento do projeto; o segundo parâmetro modificado foi a relação de transmissão considerada, pois utilizamos 3 opções de transmissão:

- Transmissão 5 velocidades mecânica (utilizando todas as relações).
- Transmissão de 5 velocidades (utilizando apenas 1ª marcha com relação 2,61 com redução de 3,82).
- Transmissão de 5 velocidades (utilizando apenas 2ª marcha com relação de 1,94 com redução de 3,82).

O último parâmetro modificado foi o modelo de diâmetro de roda e pneu (Wheel/Axle), foi adicionada a medida 185/70R14 para este parâmetro. Todas as alterações realizadas no Matlab para esta simulação, encontram-se no apêndice A.

O diagrama de bloco da arquitetura puramente elétrica é obtido através do software Simulink e esta apresentado na figura 42.

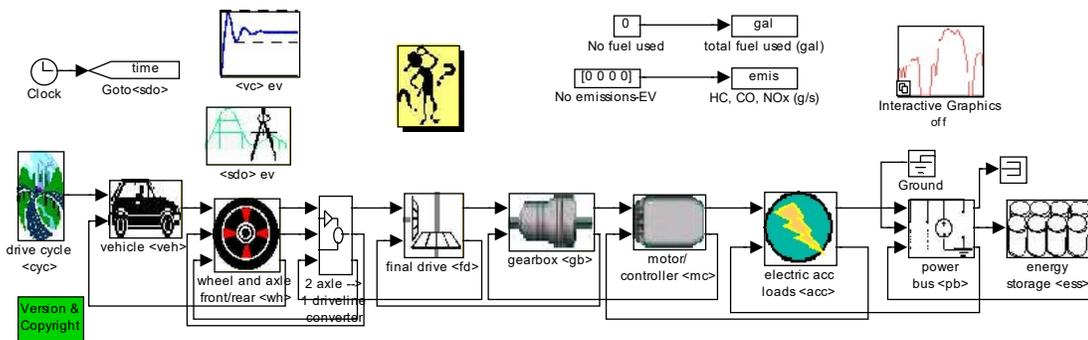


Figura 42 – Diagrama de blocos do veículo puramente elétrico

Fonte: Autor, 2017

Analisando a figura 42, temos a seguinte sequência de blocos, iniciando pela esquerda temos:

- Drive cycle: Neste bloco temos as informações sobre os ciclos de rodagem escolhido.
- Vehicle: Este bloco possui informações e características aerodinâmicas do veículo, para a nossa simulação adotamos um modelo small truck, alterando os dados relativos a massa do veículo. Este bloco é responsável por realizar cálculos como força contrária ao movimento do veículo, força e a velocidade requerida aos pneus do veículo.
- Wheel and Axle: Este bloco é onde consideramos as variáveis de escorregamento, perdas, forças de tração nos eixos, forças de frenagem nas rodas. Todas essas variáveis são consideradas nos cálculos da força de tração e a velocidade nos eixos do veículo; com esses cálculos temos como saída deste bloco a força requerida e a força disponível.
- Axle na Driveline converter: Este bloco é responsável alimentar as demais interfaces do sistema com a informação referente ao eixo de tração do veículo, frontal ou traseiro ou ainda se é tração integral.
- Final Drive: A função deste bloco é transferir as solicitações da roda e eixo para a transmissão. Essas solicitações são velocidade e torque. As relações de engrenagem e efeitos da perda de torque nas engrenagens são tratadas neste bloco.

- Gearbox: Este bloco no ADVISOR faz a comunicação das informações relacionadas as grandezas físicas como: Torque, velocidade e potência, com os submodelos final drive e maquina elétrica.
- Clutch: Este bloco pode ter três estados de operação: Totalmente engatado, desengatado e neutro. Este bloco é responsável por transmitir as solicitações de torque e velocidade para o bloco fuel converter e o inverso também, do fuel converter para a gearbox.
- Mechanical Accessory Loads: Este bloco representa todas as cargas adicionais necessárias na simulação do veículo.
- Energy Storage: Este é fundamental na simulação, pois é responsável pelo sistema de armazenamento de energia utilizado no VE.

Os demais blocos são blocos de controle e responsáveis pela resposta da simulação a ser realizada.

4.4 SIMULAÇÃO DE MODELO DE BANCO BATERIAS CHUMBO ÁCIDO (PB) PROPOSTO PARA O VE

O modelo de bateria chumbo ácido (Pb) modelado no capítulo anterior será simulado no software ADVISOR, considerando a arquitetura veicular demonstrada na tabela 2.

Tabela 2 – Dados inseridos no software ADVISOR

Dados VE com baterias (Pb) simulado no ADVISOR	
Tipo de veículo	Veículo de carga - 2 passageiros (Similar a uma VW Saveiro)
Máquina Elétrica	Motor Indução Westinghouse - 19KW ~ 25cv
Banco de baterias (Pb)	25 módulos - Baterias Hawker Genesis 12v26Ah10EP / VRLA Battery
Acessórios	700W - Considerado para cargas elétricas necessárias para o veículo

Fonte: Autor, 2017

Para iniciar a simulação no ADVISOR, é mandatório que se escolha um procedimento de teste a ser utilizado. Na simulação realizada foram utilizados os ciclos de condução apresentados no item 4.2.

4.4.1 Simulação considerando rota São José dos Campos X Caçapava – Cleveland

Na simulação deste modelo utilizamos o ciclo *Cleveland* e as opções de relação de transmissão apresentadas na tabela 3. Após a escolha do tipo de transmissão realizamos a simulação para cada tipo de transmissão e os resultados obtidos são apresentados nas figuras 43, 44 e 45.

Tabela 3 – Tipo de transmissão e relações de marcha

TIPO DE TRANSMISSÃO	RELAÇÕES DE MARCHA	DIFERENCIAL
5 VELOCIDADES	2,62 1,94 1,21 0,86 0,64	3,82
1 VELOCIDADE (1ª Marcha)	2,61	3,82
1 VELOCIDADE (2ª Marcha)	1,94	3,82

Fonte: Autor, 2017

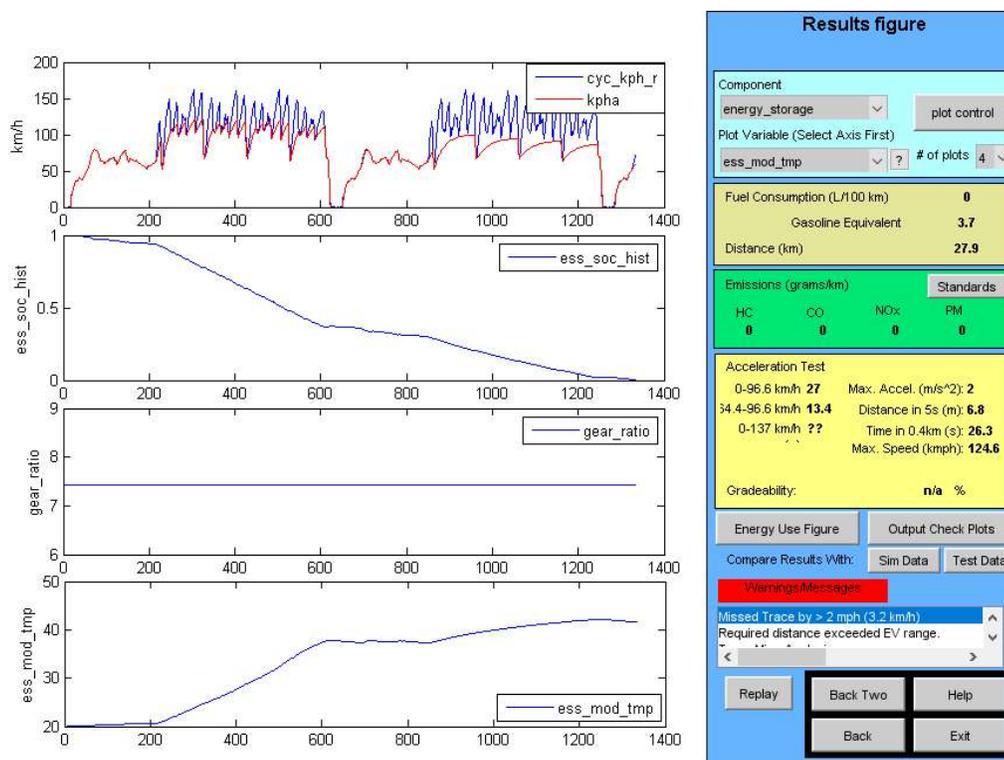


Figura 43 – Resultados ciclo *Cleveland* utilizando apenas a 2ª marcha (Pb)

Fonte: Autor, 2017

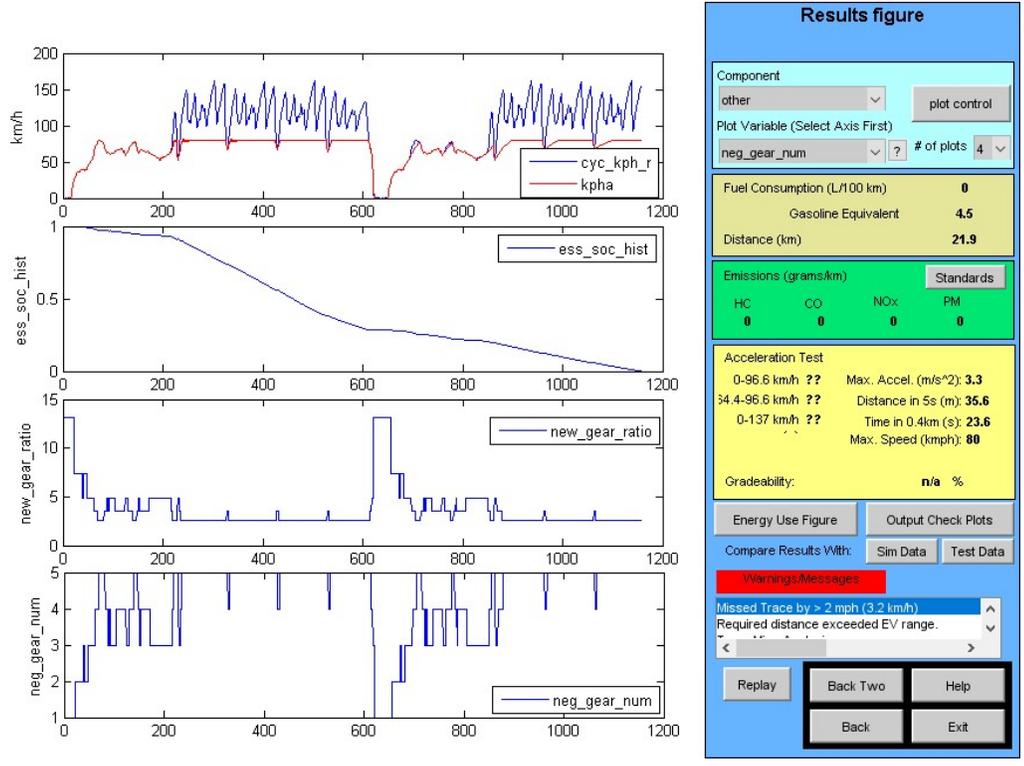


Figura 44 – Resultados ciclo *Cleveland* utilizando 5 marchas (Pb)

Fonte: Autor, 2017

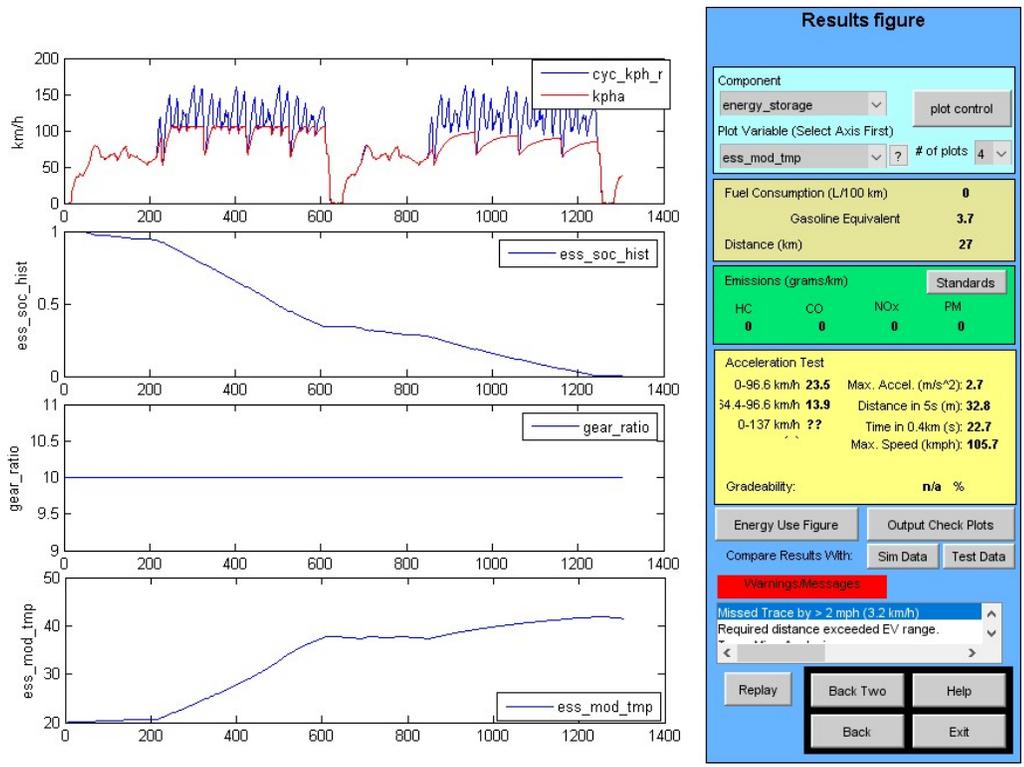


Figura 45 – Resultados ciclo *Cleveland* utilizando apenas a 1ª marcha (Pb)

Fonte: Autor, 2017

Os resultados apresentados nas figuras 43, 44 e 45, são referentes aos seguintes parâmetros:

- Km/h: Apresenta a velocidade do veículo solicitada durante o ciclo de condução simulado (cyc_kph_r) e velocidade alcançada com a configuração escolhida (kpha).
- Ess_soc_hist: Apresenta o histórico do estado de carga da bateria.
- Gear_ratio: Apresenta a relação de marchas utilizada durante o percurso.
- Ess_mod_tmp: Temperatura do banco de baterias durante o ciclo de condução (°C).
- New_gear_ratio: Trocas de marchas necessárias ao longo do percurso, apresentado as variações em função da velocidade solicitada (considerando a limitação de Rpm necessária em um MCI).
- Neg_gear_num: Posições no câmbio utilizada durante o percurso.

Na tabela 4, é apresentado o mapa de eficiência energética para as modelos simulados na rota entre as cidades de São José dos Campos e Caçapava.

Tabela 4 – Eficiência energética (Pb) na rota São José dos Campos X Caçapava

Rota São José dos Campos X Caçapava – Cleveland			
	5 MARCHAS	APENAS 1^a MARCHA	APENAS 2^a MARCHA
BANCO DE BATERIAS	67%	67%	66%
MÁQUINA ELÉTRICA	80%	85%	90%
TRANSMISSÃO	95%	96%	96%

Fonte: Autor, 2017

4.4.2 Simulação considerando rota Tremembé X Capivari – VAIL2NREL

Na simulação deste modelo utilizamos o ciclo *VAIL2NREL* e as opções de relação de transmissão apresentadas na tabela 3. Para cada tipo de transmissão realizamos uma simulação e os resultados obtidos são apresentados nas figuras 46, 47 e 48.

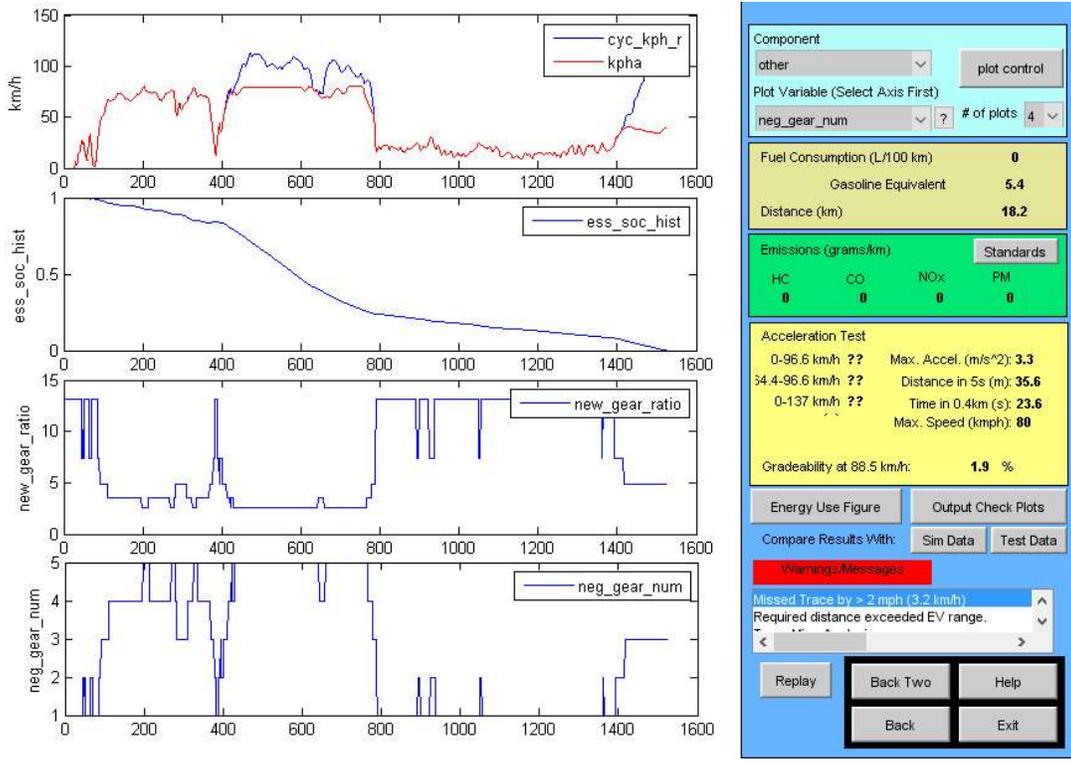


Figura 46 – Resultados ciclo VAIL2NREL utilizando 5 marchas (Pb)

Fonte: Autor, 2017

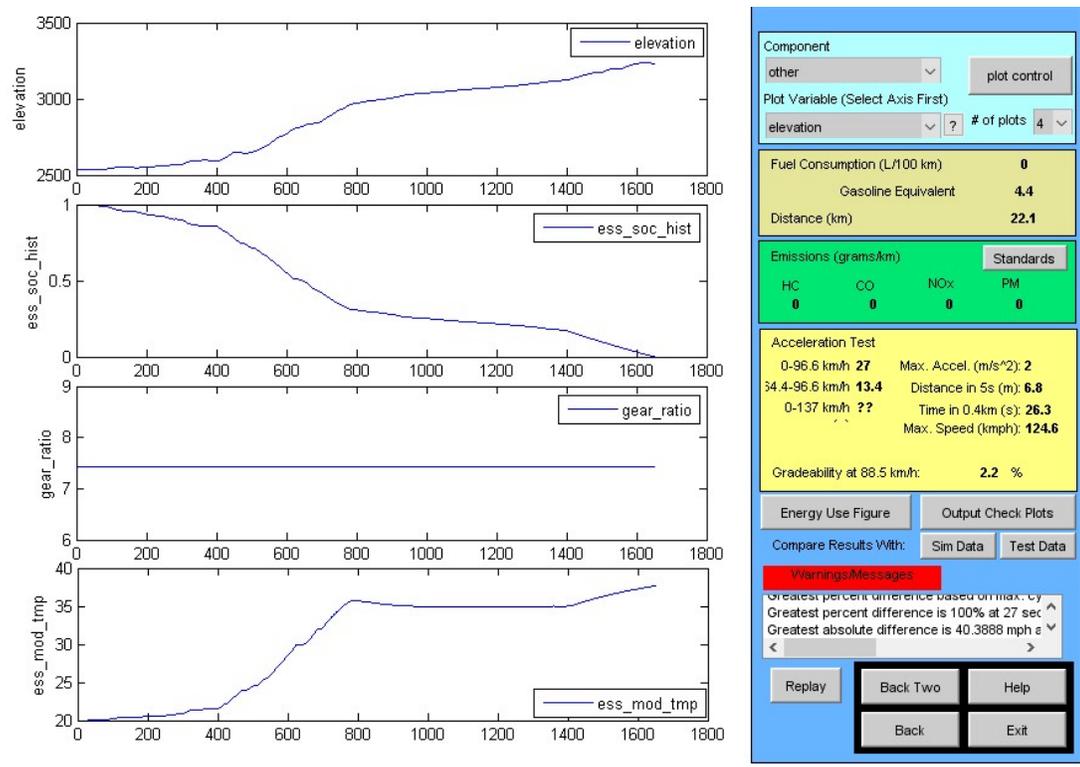


Figura 47 – Resultados ciclo VAIL2NREL utilizando apenas a 2ª marcha (Pb)

Fonte: Autor, 2017

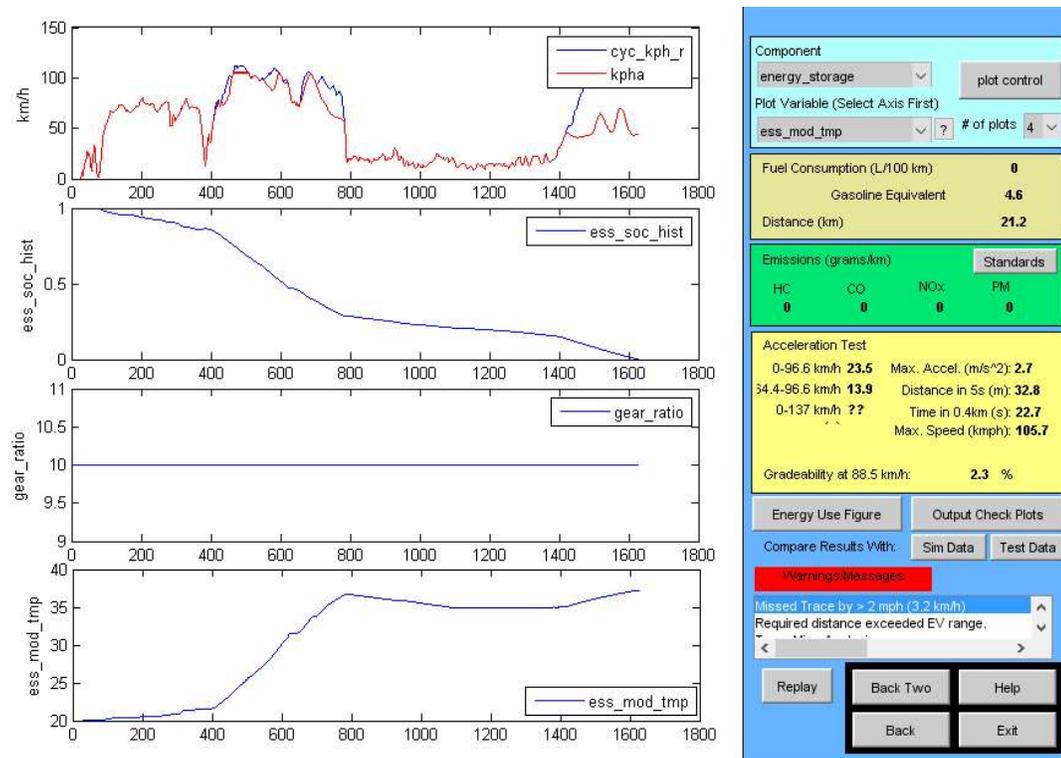


Figura 48 – Resultados ciclo VAIL2NREL utilizando apenas a 1ª marcha (Pb)

Fonte: Autor, 2017

Os resultados apresentados nas figuras 46, 47 e 48, são referentes aos seguintes parâmetros:

- Km/h: Apresenta a velocidade do veículo solicitada durante o ciclo de condução simulado (cyc_kph_r) e velocidade alcançada com a configuração escolhida (kpha).
- Elevation: Nivel de elevação da estrada ao longo da viagem.
- Ess_soc_hist: Apresenta o histórico do estado de carga da bateria.
- Gear_ratio: Apresenta a relação de marchas utilizada durante o percurso.
- Ess_mod_tmp: Temperatura do banco de baterias durante o ciclo de condução (°C).
- New_gear_ratio: Trocas de marchas necessárias ao longo do percurso, apresentado as variações em função da velocidade solicitada (considerando a limitação de Rpm necessária em um MCI).
- Neg_gear_num: Posições no câmbio utilizada durante o percurso.

A tabela 5, apresenta o mapa de eficiência energética para os modelos simulados na rota de subida de serra entre as cidades de Tremembé e Capivari.

Tabela 5 – Eficiência energética (Pb) na rota Tremembé X Capivari

Rota Tremembé X Capivari – VAIL2NREAL			
	5 MARCHAS	APENAS 1^a MARCHA	APENAS 2^a MARCHA
BANCO DE BATERIAS	72%	73%	73%
MÁQUINA ELÉTRICA	84%	87%	88%
TRANSMISSÃO	95%	96%	95%

Fonte: Autor, 2017

4.4.3 Simulação considerando rota Taubaté X Tremembé – FTP – 72

Na simulação da rota entre as cidades de Taubaté X Tremembé foi considerado o ciclo de condução FTP – 72 e as opções de relação de transmissão apresentadas na tabela 3. Após a escolha do tipo de transmissão foi realizada a simulação para cada tipo de transmissão e os resultados obtidos são apresentados nas figuras 49, 50 e 51.

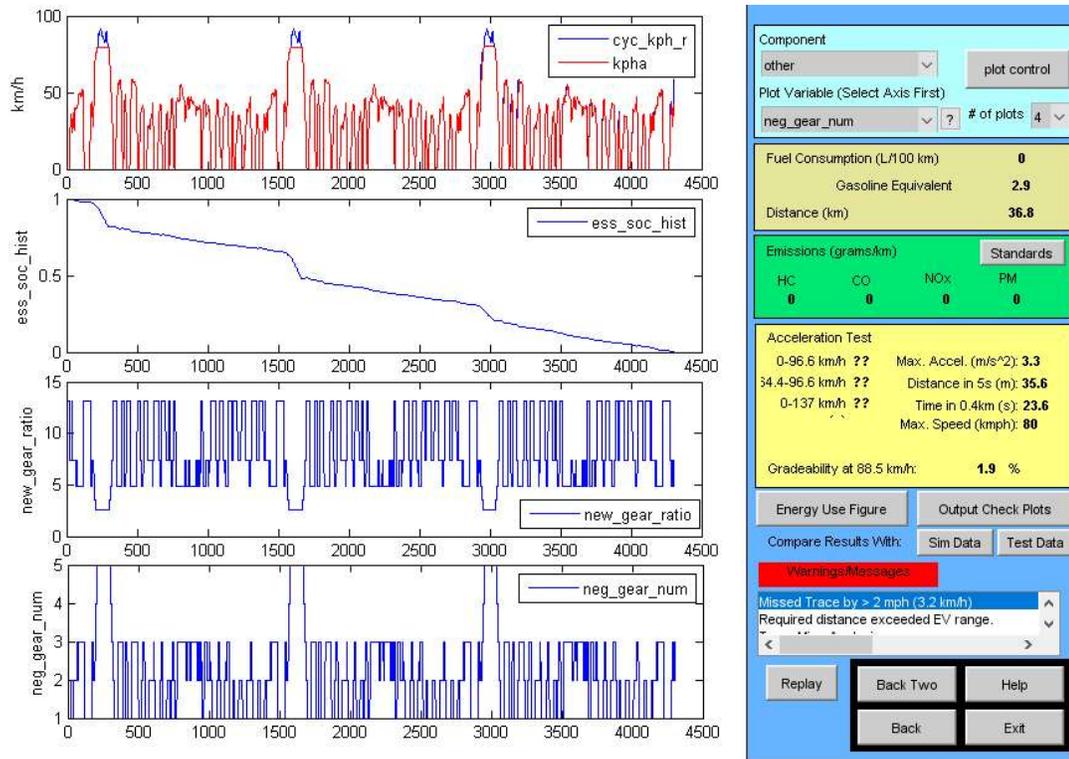


Figura 49 – Resultados ciclo FTP – 72 utilizando 5 marchas (Pb)

Fonte: Autor, 2017

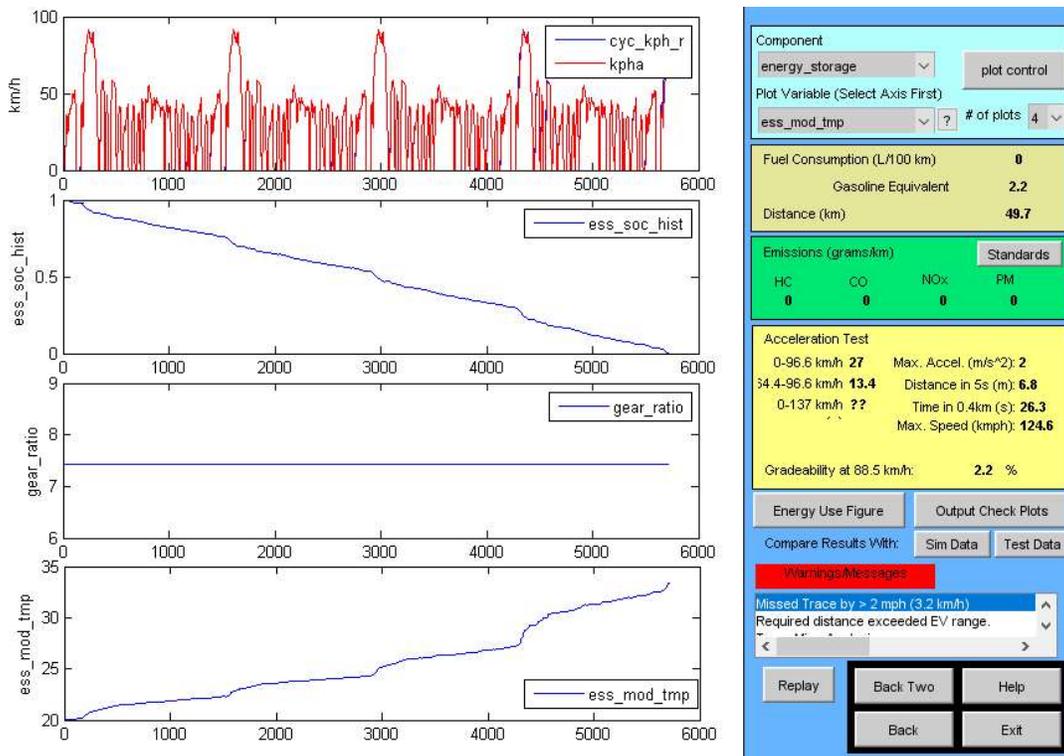


Figura 50 – Resultados ciclo FTP – 72 utilizando apenas a 2ª marcha (Pb)

Fonte: Autor, 2017

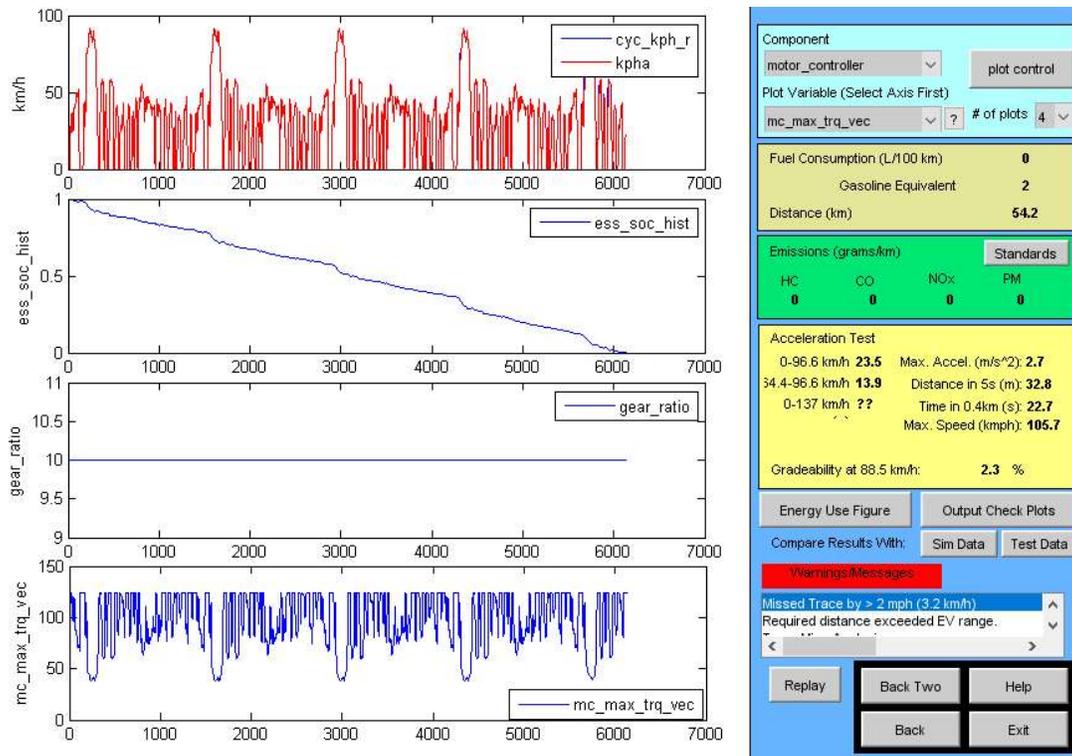


Figura 51 – Resultados ciclo *FTP* – 72 utilizando apenas a 1ª marcha (Pb)

Fonte: Autor, 2017

Os resultados apresentados nas figuras 49, 50 e 51, são referentes aos seguintes parâmetros:

- Km/h: Apresenta a velocidade do veículo solicitada durante o ciclo de condução simulado (*cyc_kph_r*) e velocidade alcançada com a configuração escolhida (*kpha*).
- *Ess_soc_hist*: Apresenta o histórico do estado de carga da bateria.
- *Gear_ratio*: Apresenta a relação de marchas utilizada durante o percurso.
- *Ess_mod_tmp*: Temperatura do banco de baterias durante o ciclo de condução (°C).
- *New_gear_ratio*: Trocas de marchas necessárias ao longo do percurso, apresentado as variações em função da velocidade solicitada (considerando a limitação de Rpm necessária em um MCI).
- *Neg_gear_num*: Posições no câmbio utilizada durante o percurso.
- *Mc_max_trq_vec*: Torque máximo atingido ao longo do percurso ((N*m)

A tabela 6, apresenta o mapa de eficiência energética para os modelos simulados na rota de cidade considerado no perímetro urbano entre as cidades de Taubaté e Tremembé.

Tabela 6 – Eficiência energética (Pb) na rota Taubaté X Tremembé

Rota Taubaté X Tremembé – FTP - 72			
	5 MARCHAS	APENAS 1ª MARCHA	APENAS 2ª MARCHA
BANCO DE BATERIAS	76%	79%	80%
MÁQUINA ELÉTRICA	84%	86%	86%
TRANSMISSÃO	93%	96%	92%

Fonte: Autor, 2017

4.5 SIMULAÇÃO DE MODELO DE BANCO BATERIAS LÍTIO – ÍON (LI-ÍON) PROPOSTO PARA O VE

Para a simulação do banco de baterias Lítio - íon modelado no capítulo anterior utilizamos o software ADVISOR para simular a aplicação deste modelo de banco no veículo puramente elétrico em desenvolvimento. A tabela 7 mostra os parâmetros utilizados na simulação.

Tabela 7 – Dados inseridos no software ADVISOR

Dados VE com baterias (Li-ion) simulado no ADVISOR	
Tipo de veículo	Veículo de carga - 2 passageiros (Similar a uma VW Saveiro)
Máquina Elétrica	Motor Indução Westinghouse - 19KW ~ 25cv
Banco de baterias (Li-íon)	100 módulos - Baterias 6Ah / Saft Battery
Acessórios	700W - Considerado para cargas elétricas necessárias para o veículo

Fonte: Autor, 2017

Para esta arquitetura veicular com banco de baterias de Lítio – íon, foram realizadas algumas modificações no modelo originalmente proposto no software ADVISOR. Essas alterações são demonstradas na figura 41.

Para iniciar a simulação no ADVISOR, é mandatório que se escolha um procedimento de teste a ser utilizado. Na simulação realizada foram utilizados os ciclos de condução apresentados no item 4.2.

4.5.1 Simulação considerando rota São José dos Campos X Caçapava – Cleveland

Na simulação da rota São José dos Campos X Caçapava pela rodovia Governador Carvalho Pinto com banco de baterias de lítio – íon, utilizamos o ciclo *Cleveland* e as opções de relação de transmissão apresentadas na tabela 3. Após a escolha do tipo de transmissão realizamos a simulação para cada tipo de transmissão e os resultados obtidos são apresentados nas figuras 52, 53 e 54.

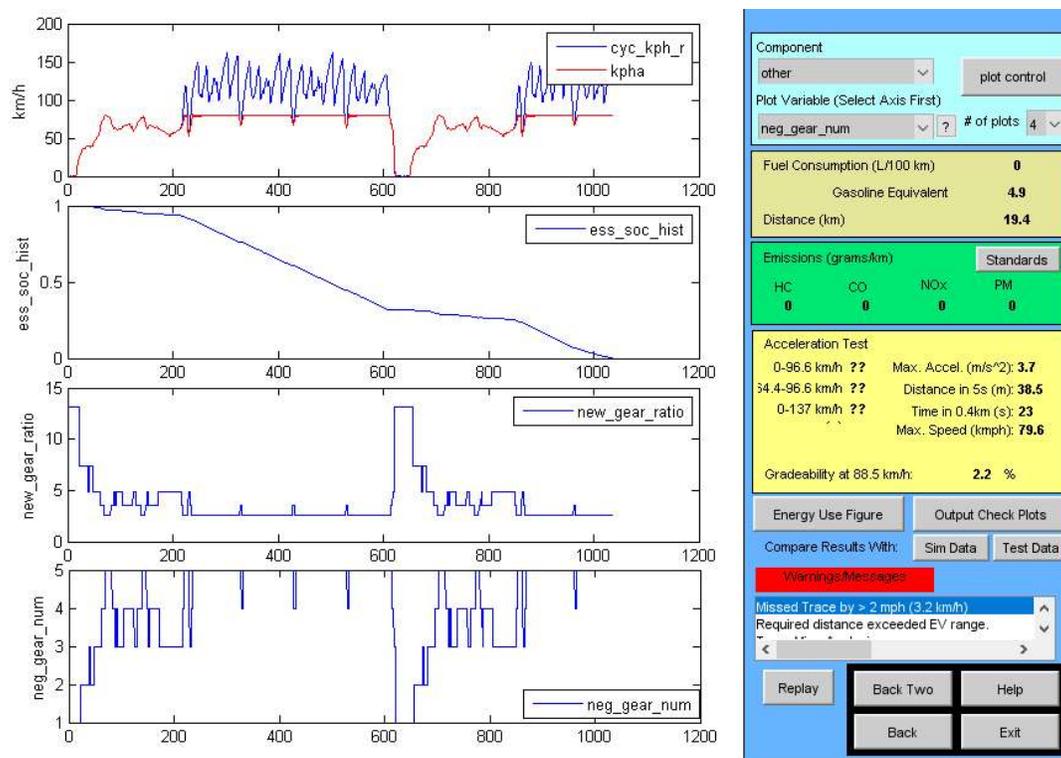


Figura 52 – Resultados ciclo *Cleveland* utilizando 5 marchas (Li - íon)

Fonte: Autor, 2017

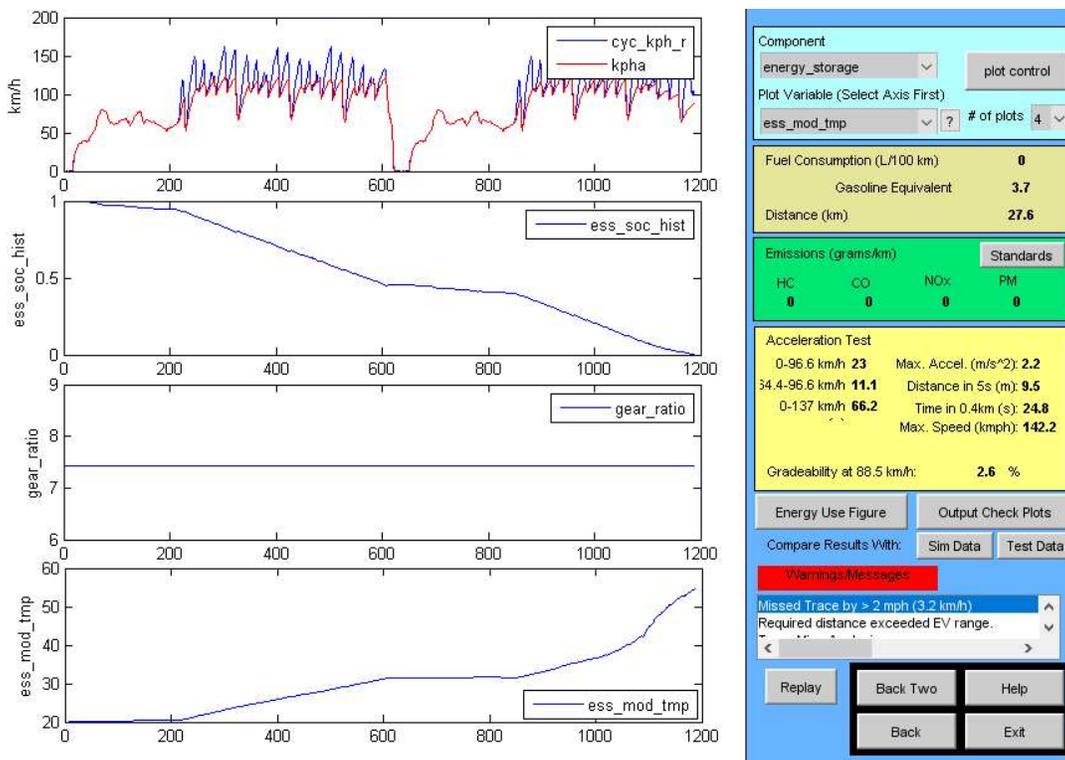


Figura 53 – Resultados ciclo *Cleveland* utilizando apenas a 2ª marcha (Li - íon)

Fonte: Autor, 2017

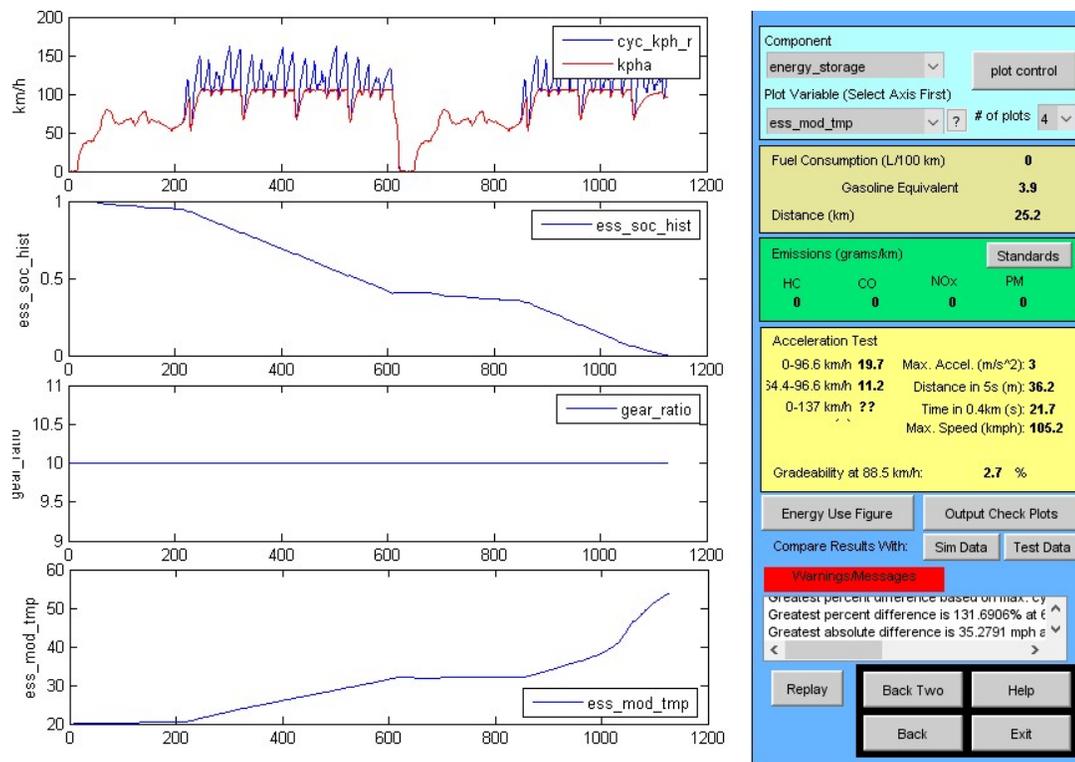


Figura 54 – Resultados ciclo *Cleveland* utilizando apenas a 1ª marcha (Li - íon)

Fonte: Autor, 2017

Os resultados apresentados nas figuras 52, 53 e 54, são referentes aos seguintes parâmetros:

- Km/h: Apresenta a velocidade do veículo solicitada durante o ciclo de condução simulado (cyc_kph_r) e velocidade alcançada com a configuração escolhida (kpha).
- Ess_soc_hist: Apresenta o histórico do estado de carga da bateria.
- Gear_ratio: Apresenta a relação de marchas utilizada durante o percurso.
- Ess_mod_tmp: Temperatura do banco de baterias durante o ciclo de condução (°C).
- New_gear_ratio: Trocas de marchas necessárias ao longo do percurso, apresentado as variações em função da velocidade solicitada (considerando a limitação de Rpm necessária em um MCI).
- Neg_gear_num: Posições no câmbio utilizada durante o percurso.

Na tabela 8, é apresentado o mapa de eficiência energética para os modelos simulados na rota entre as cidades de São José dos Campos e Caçapava considerando um sistema de armazenamento baterias de Lítio – íon.

Tabela 8 – Eficiência energética (Li-íon) na rota São José dos Campos X Caçapava

Rota São José dos Campos X Caçapava – Cleveland			
	5 MARCHAS	APENAS 1^a MARCHA	APENAS 2^a MARCHA
BANCO DE BATERIAS	86%	85%	85%
MÁQUINA ELÉTRICA	79%	82%	89%
TRANSMISSÃO	95%	96%	96%

Fonte: Autor, 2017

4.5.2 Simulação considerando rota Tremembé X Capivari – VAIL2NREL

Na simulação da rota de rodovia com subida de serra entre as cidades Tremembé X Capivari com banco de baterias de lítio – íon, foi considerado o ciclo VAIL2NREL e as opções de relação de transmissão apresentadas na tabela 3. Para cada tipo de transmissão realizamos uma simulação e os resultados obtidos são apresentados nas figuras 55, 56 e 57.

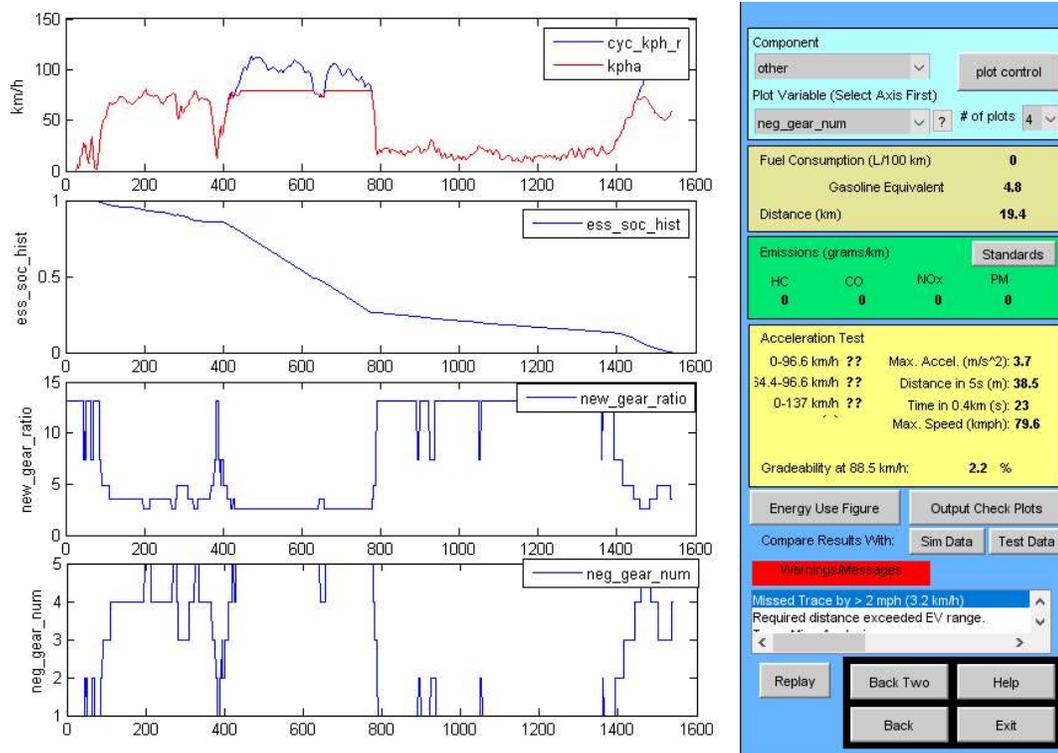


Figura 55 – Resultados ciclo VAIL2NREL utilizando 5 marchas (Li - íon)

Fonte: Autor, 2017

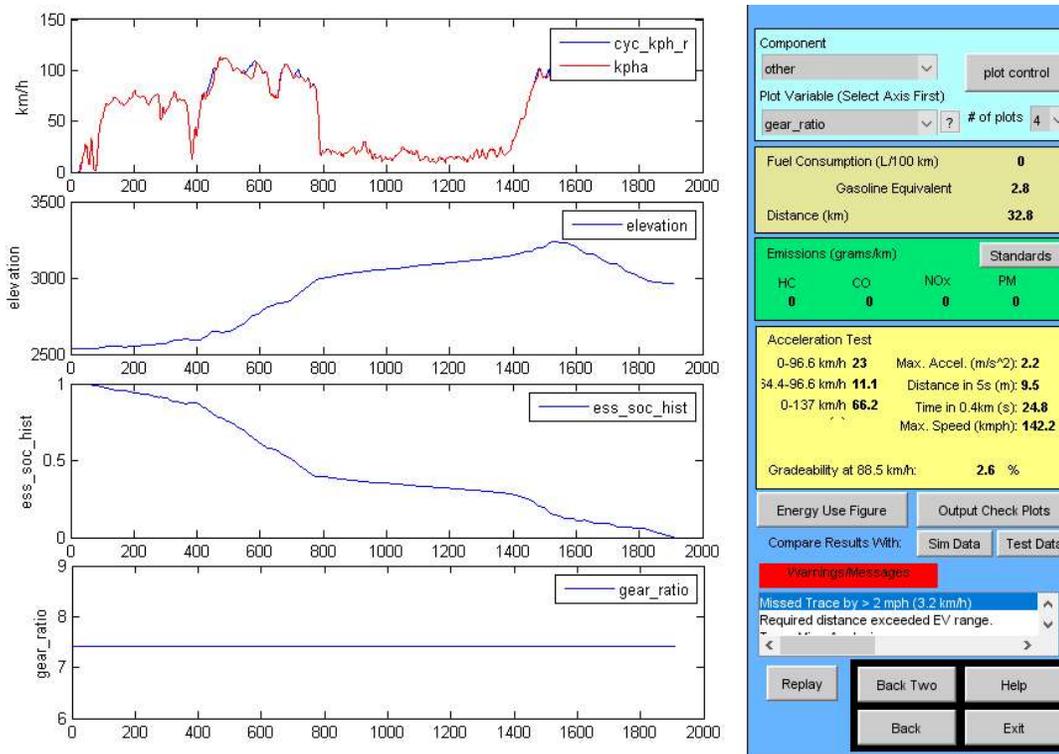


Figura 56 – Resultados ciclo VAIL2NREL utilizando apenas a 2ª marcha (Li - íon)

Fonte: Autor, 2017

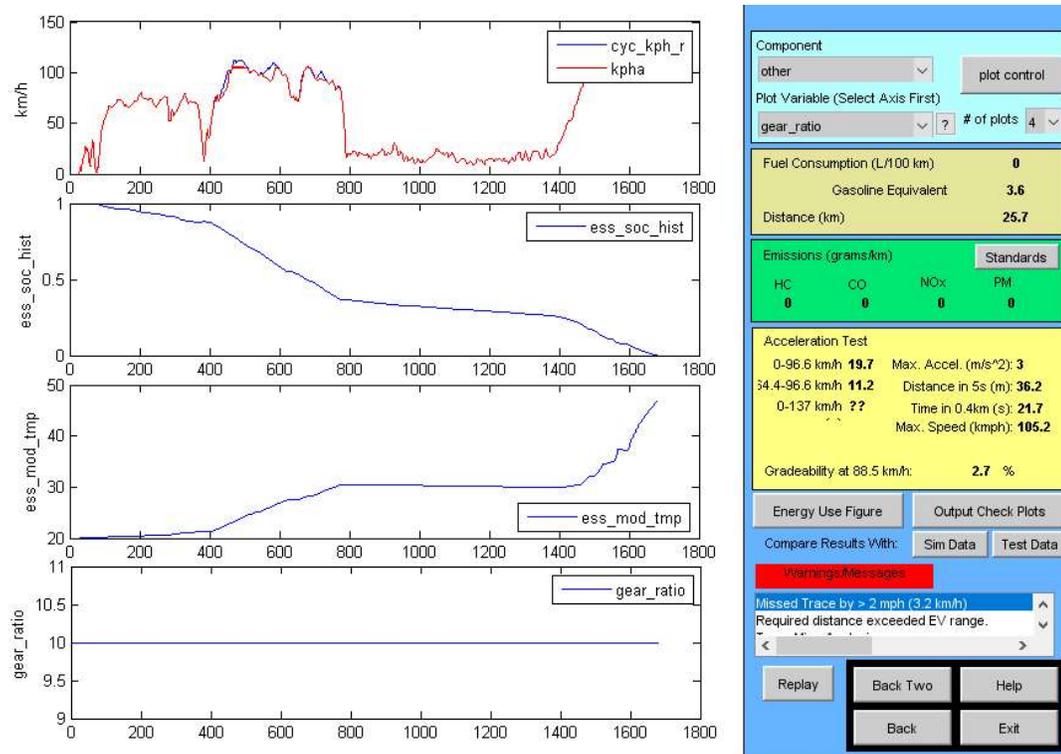


Figura 57 – Resultados ciclo VAIL2NREL utilizando apenas a 1ª marcha (Li - íon)

Fonte: Autor, 2017

Os resultados apresentados nas figuras 55, 56 e 57, são referentes aos seguintes parâmetros:

- Km/h: Apresenta a velocidade do veículo solicitada durante o ciclo de condução simulado (cyc_kph_r) e velocidade alcançada com a configuração escolhida (kpha).
- Elevation: Nivel de elevação da estrada ao longo da viagem.
- Ess_soc_hist: Apresenta o histórico do estado de carga da bateria.
- Gear_ratio: Apresenta a relação de marchas utilizada durante o percurso.
- Ess_mod_tmp: Temperatura do banco de baterias durante o ciclo de condução (°C).
- New_gear_ratio: Trocas de marchas necessárias ao longo do percurso, apresentado as variações em função da velocidade solicitada (considerando a limitação de Rpm necessária em um MCI).
- Neg_gear_num: Posições no câmbio utilizada durante o percurso.

A tabela 9, apresenta o mapa de eficiência energética para os modelos simulados na rota de subida de serra entre as cidades de Tremembé e Capivari.

Tabela 9 – Eficiência energética (Pb) na rota Tremembé X Capivari

Rota Tremembé X Capivari – VAIL2NREAL			
	5 MARCHAS	APENAS 1^a MARCHA	APENAS 2^a MARCHA
BANCO DE BATERIAS	88%	88%	90%
MÁQUINA ELÉTRICA	81%	82%	83%
TRANSMISSÃO	95%	96%	94%

Fonte: Autor, 2017

4.5.3 Simulação considerando rota Taubaté X Tremembé – FTP – 72

Na simulação da rota urbana entre as cidades de Taubaté X Tremembé com banco de baterias de lítio – íon, foi considerado o ciclo de condução FTP – 72 e as opções de relação de transmissão apresentadas na tabela 3. Após a escolha do tipo de transmissão foi realizada a simulação para cada tipo de transmissão e os resultados obtidos são apresentados nas figuras 58, 59 e 60.

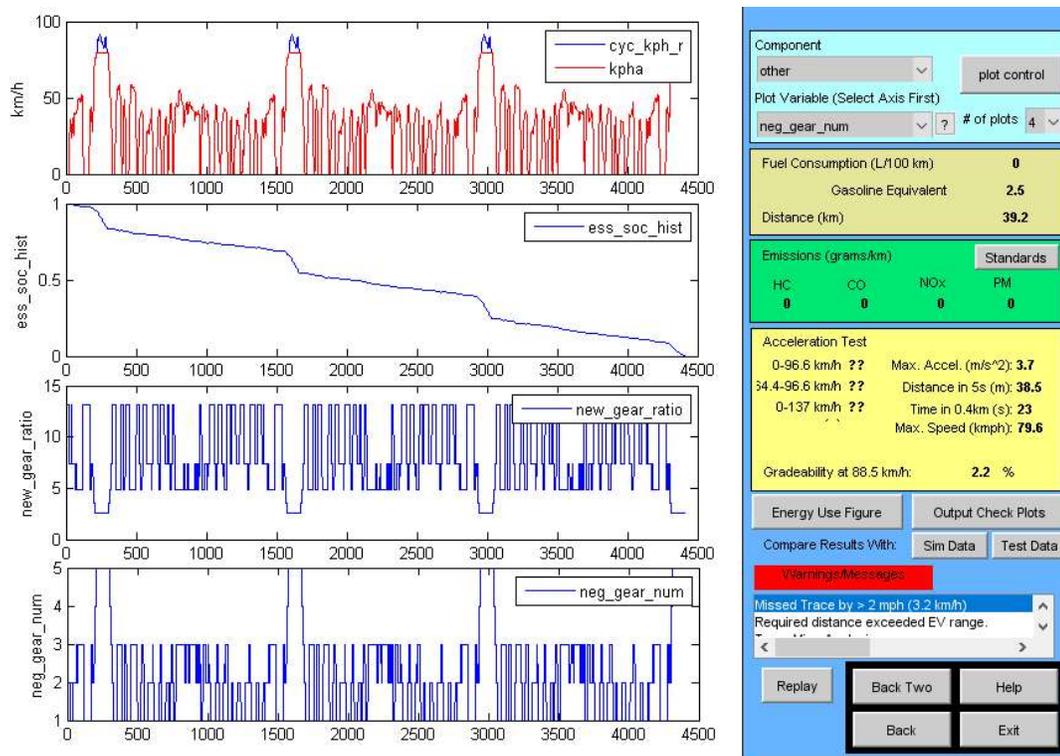


Figura 58 – Resultados ciclo FTP – 72 utilizando 5 marchas (Li - íon)

Fonte: Autor, 2017

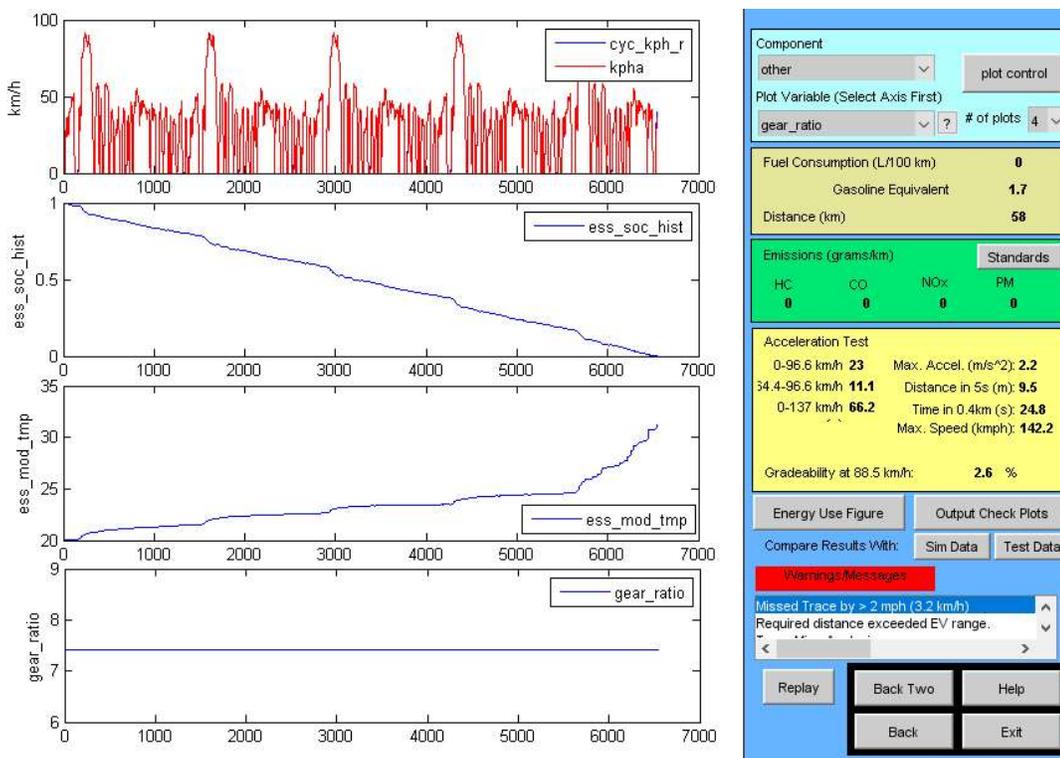


Figura 59 – Resultados ciclo FTP – 72 utilizando apenas a 2ª marcha (Li - íon)

Fonte: Autor, 2017

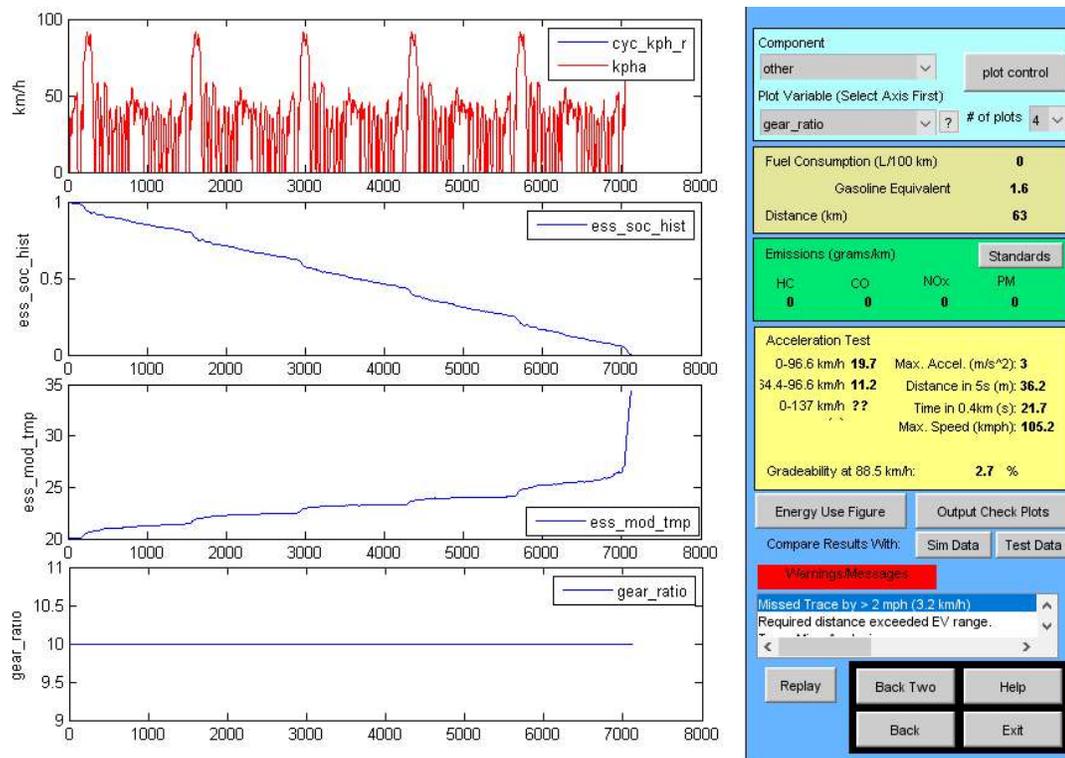


Figura 60 – Resultados ciclo FTP – 72 utilizando apenas a 1ª marcha (Li - íon)

Fonte: Autor, 2017

Os resultados apresentados nas figuras 58, 59 e 60, são referentes aos seguintes parâmetros:

- Km/h: Apresenta a velocidade do veículo solicitada durante o ciclo de condução simulado (cyc_kph_r) e velocidade alcançada com a configuração escolhida (kpha).
- Ess_soc_hist: Apresenta o histórico do estado de carga da bateria.
- Gear_ratio: Apresenta a relação de marchas utilizada durante o percurso.
- Ess_mod_tmp: Temperatura do banco de baterias durante o ciclo de condução (°C).
- New_gear_ratio: Trocas de marchas necessárias ao longo do percurso, apresentado as variações em função da velocidade solicitada (considerando a limitação de Rpm necessária em um MCI).
- Neg_gear_num: Posições no câmbio utilizada durante o percurso.
- Mc_max_trq_vec: Torque máximo atingido ao longo do percurso ((N*m)

Tabela 10 – Eficiência energética (Li - ion) na rota Taubaté X Tremembé

Rota Taubaté X Tremembé – FTP - 72			
	5 MARCHAS	APENAS 1^a MARCHA	APENAS 2^a MARCHA
BANCO DE BATERIAS	91%	93%	94%
MÁQUINA ELÉTRICA	83%	86%	85%
TRANSMISSÃO	93%	96%	91%

Fonte: Autor, 2017

A tabela 10, apresenta o mapa de eficiência energética para os modelos simulados considerando a rota de cidade no perímetro urbano entre as cidades de Taubaté e Tremembé.

5 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS SIMULADOS

As duas configurações de banco de baterias simuladas neste trabalho, apresentam a mesma configuração veicular: motor elétrico, cargas elétricas auxiliares de 700 W e carga considerada de 200kg. Com este parâmetro inicial foram realizadas as simulações considerando os dois cenários de banco de baterias propostos neste estudo: banco de baterias Chumbo Ácido e banco de baterias Lítio – Íon.

Conforme demonstrado no capítulo 2, cada tipo de bateria tem uma característica construção e de funcionamento. Esta diferença entre os modelos de baterias propostos neste estudo, ficam evidenciadas nos resultados encontrados durante as simulações.

Os resultados apresentados nas tabelas das simulações do capítulo anterior apresentam uma eficiência dos bancos de baterias entre 67% e 80% para o banco com baterias de chumbo ácido e 85% e 96% para o banco com baterias de lítio – íon, desta forma, o banco com baterias de lítio – íon de maneira geral tem uma eficiência superior e tem menor peso que o banco com baterias de chumbo ácido.

É possível evidenciar que em ambas aplicações de banco de baterias quando utilizamos a opção de transmissão com 5 velocidades com todas as relações, houve uma limitação de velocidade em 78,5 km/h durante todas as rotas simuladas, as demais opções de transmissão apresentaram velocidades máximas de até 142km/h com a opção de relação única com a 2ª marcha. Os gráficos apresentados nas figuras 52 e 61, mostram que as duas opções de sistema de armazenamento de energia apresentam a maior autonomia durante o ciclo urbano considerado entre as cidades de Taubaté e Tremembé utilizando o ciclo *FTP – 72*. Neste ciclo os veículos apresentaram uma autonomia de 63 km para o banco com baterias de Li – íon e 54,2 km para o banco com baterias de Pb, ambas os modelos utilizaram apenas a relação de 1º marcha na simulação.

Na análise da configuração das transmissões utilizadas, pode-se verificar no gráfico da figura 62 que quando foi utilizada a transmissão de 5 velocidades com todas as relações de marchas, as autonomies dos sistemas de armazenamento são muito próximas, com diferença entre os sistemas de armazenamento de energia de apenas 1,2 km na rota de rodovia com subida de serra.

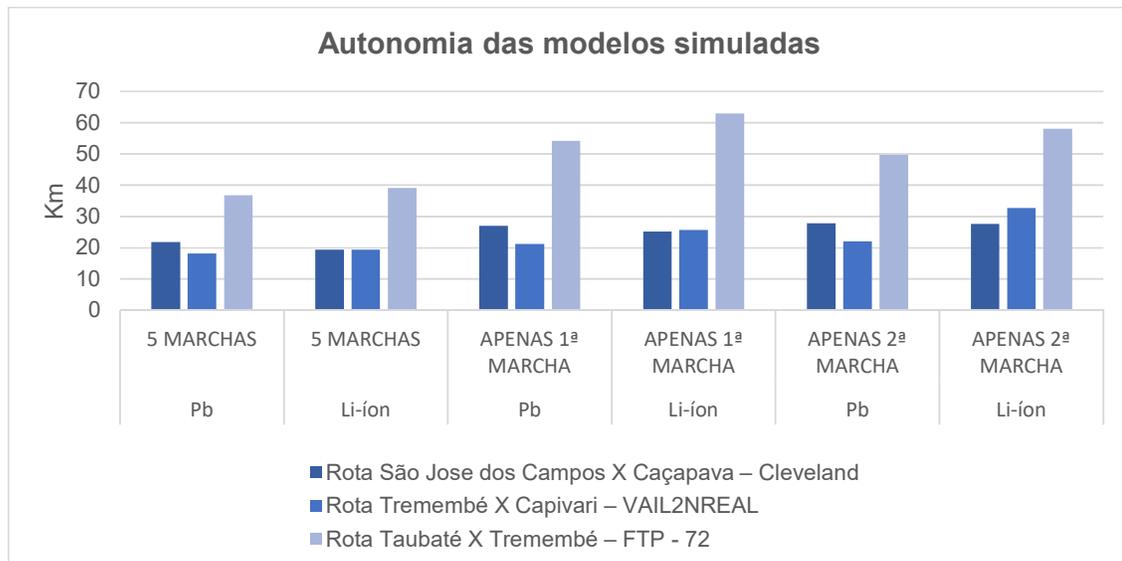


Figura 62 – Autonomia em Km dos modelos simulados

Fonte: Autor, 2017

Nas rotas urbanas e rodoviárias consideradas nas simulações, a autonomia e eficiência do sistema de armazenamento de energia, quando se utiliza apenas uma das relações é superior.

Os ciclos de condução utilizados nas simulações foram considerados com objetivo de estabelecer uma correlação com rotas utilizadas na região do Vale do Paraíba Paulista, onde veículo protótipo após sua construção poderá ser utilizado. Esses ciclos de construção considerados na simulação possuem características construtivas distintas o que permitiu a reprodução de situações de aplicação diversas para o VE e a partir das análises dos resultados foi possível visualizar qual a melhor modelo a ser utilizado considerando a possível aplicação do veículo.

Tabela 11 – Melhor configuração veicular em função da rota de utilização

ROTA	SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	TIPO DE TRANSMISSÃO
Rota São José dos Campos X Caçapava – <i>Cleveland</i>	Chumbo Ácido (Pb)	Relação única - 2ª Marcha
Rota Tremembé X Capivari – <i>VAIL2NREAL</i>	Lítio - íon (Li-íon)	Relação única - 2ª Marcha
Rota Taubaté X Tremembé – <i>FTP - 72</i>	Lítio - íon (Li-íon)	Relação única - 1ª Marcha

Fonte: Autor, 2017

A tabela 11, apresenta quais são as configurações que apresentaram o melhor desempenho e autonomia em cada rota simulada, desta forma temos recomendação de aplicação em função da utilização do veículo. É possível constatar analisando a tabela 11 que o sistema de armazenamento de energia com baterias de chumbo ácido para a rota rodoviária entre as cidades de São José dos Campos e Caçapava utilizando o ciclo de condução *Cleveland* foi o que apresentou melhores resultados e para as demais rotas os sistemas com baterias de lítio – íon apresentou desempenho superior.

6 CONCLUSÕES

O tema VE tem sido amplamente estudado e discutido na comunidade acadêmica nos últimos 20 anos. Empresas do setor automotivo em parceria com universidades e seus centros de pesquisa, têm estudado diversas tecnologias que buscam antecipar a viabilidade da produção do VE em grande escala. Dentre os diversos itens que compõem a arquitetura do VE, o sistema de armazenamento de energia tem uma função primordial na arquitetura do VE ou VEH, pois este sistema é fundamental para o funcionamento do veículo.

Para a realização desta dissertação foi realizada uma pesquisa bibliográfica abrangente, onde foi possível o estudo dos principais tipos de veículos, motorização e principalmente, as principais opções de sistema de armazenamento de energia aplicadas a veículos. Com as informações obtidas na revisão bibliográfica, foi possível realizar a modelagem de duas propostas de banco de armazenamento de energia para o VE em desenvolvimento na UNITAU, sendo uma opção com baterias de chumbo ácido e outra opção com baterias de Lítio – íon.

Com a modelagem, foram realizadas as simulações utilizando os softwares MATLAB e ADVISOR, onde foi possível obter resultados com a utilização dos banco de baterias chumbo ácido e lítio – íon e de 3 opções de relação de marcha para uma transmissão mecânica de 5 velocidades (sendo 2 opções com relação única e 1 opção com múltiplas relações de marcha) Esses resultados proporcionaram uma análise ampla da performance do VE em diferentes condições de rodagem em ciclos urbanos e rodoviário, similares a rotas entre cidades da região do Vale do Paraíba Paulista.

A simulação no ADVISOR dos modelos propostos, permitiu a realização de análises que foram efetivas para a sugestão ao final deste trabalho das melhores opções de sistema de armazenamento de energia em função da aplicação do veículo em um determinado ciclo de condução. Desta forma, os objetivos gerais delimitados no início deste trabalho foram alcançados, pois ao final das simulações temos informações suficientes para a auxílio na tomada de decisão na escolha de um conjunto de armazenamento de energia e tipo de relação de transmissão a ser utilizada.

A modelagem e implementação utilizando os softwares Matlab e ADVISOR foram realizadas considerando duas opções de banco com baterias chumbo ácido

(Pb) e Lítio-íon (Li-íon). O modelo foi preparado considerando as informações do veículo utilizado como base no processo de conversão do VE e o diagrama de blocos dos modelos propostos foi desenvolvido utilizando o software Simulink.

O funcionamento do VE foi simulado utilizando o software ADVISOR e foram considerados 3 ciclos de condução: *Cleveland*, *VAIL2NREAL* e *FTP – 72* esses ciclos de condução foram escolhidos pois possuem grande semelhança com rotas urbanas e de autoestradas da região do Vale do Paraíba Paulista. Desta forma foi possível, simular uma aplicação do VE em rotas com características muito similares a estradas da região.

Na simulação foram consideradas 6 modelos (sistema de armazenamento e opção de relação de transmissão) para cada tipo de ciclo de condução e rota proposto no trabalho, assim temos um total de 18 combinações de relação de transmissão, sendo 6 opções transmissão por rota. Essas opções foram baseadas na utilização da transmissão de 5 velocidades aplicada ao VE e a configuração de relação única apresentou o melhor desempenho em todos os ciclos de condução simulados.

O comparativo entre os sistemas de armazenamento de energia considerando as duas opções de sistemas de armazenamento de energia foi apresentado e se mostrou satisfatório, pois com o comparativo apresentado é possível sugerir qual a configuração mais viável para uma aplicação específica. Desta forma, é possível considerar que os objetivos específicos propostos no início do trabalho foram atendidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Considerando que o projeto em desenvolvimento é de um VE e que ainda receberá uma turbina eólica e painéis solares, a preocupação com o peso do sistema de armazenamento de energia é evidente, a configuração com baterias de Lítio-íon apresentou uma redução de 58% no peso do sistema de armazenamento de energia do veículo.

Os resultados apresentados mostram que apesar da menor eficiência do sistema de armazenamento de energia com baterias de chumbo ácido deve ser considerado para uma aplicação em autoestrada sem subida de serra, pois apresenta desempenho ligeiramente superior ao Lítio – íon. Para as demais aplicações em autoestrada e urbana o banco com baterias de Lítio – íon, apresentou desempenho superior.

Os modelos propostos desenvolvidos para aplicação no protótipo de VE em desenvolvimento na UNITAU, possuem limitações de autonomia do sistema de armazenamento, pois quando comparamos o mesmo veículo com MCI tem autonomia de aproximadamente de 450km.

Com tudo, podemos concluir que a transformação de um veículo com MCI em um VE utilizando sistema de armazenamento com baterias de lítio – íon é a configuração recomendada para deslocamento urbanos diários e para viagens curtas em autoestradas com subidas elevadas como uma serra, a configuração com baterias de chumbo ácido é a configuração recomendada para viagens curtas em alto estradas sem elevação e com característica de alta velocidade, mas essa configuração não deve ser totalmente descartada para as outras rotas apresentadas neste trabalho, pois como foi possível verificar nas simulações, apresentou boa performance e por ser uma tecnologia mais conhecida, de fácil aplicação e menor custo também pode ser considerada.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Com os resultados obtidos através da simulação dos modelos no software ADVISOR é possível analisar e propor melhorias que podem otimizar a utilização do VE em desenvolvimento na UNITAU.

Como sugestão de trabalhos futuros, são sugeridas as seguintes implementações, avaliações e estudos:

- Implementar um sistema de integrado de frenagem regenerativa;
- Realizar um estudo de viabilidade de ampliação do ciclo de vida dos modelos de armazenadores de energia propostos neste trabalho;
- Estudar a viabilidade de implementação de um banco de ultracapacitores para que trabalhem em paralelo com o sistema de armazenamento de energia especificado neste trabalho;
- Propor o desenvolvimento de um ciclo de condução que represente as reais condições das estradas brasileiras para utilização nos ensaios de emissões de gases e eficiência energética realizados pelos órgãos governamentais.

- Ampliar a proposta da pesquisa em desenvolvimento atualmente, abrangendo a possibilidade de hibridização de utilizando motores MCI ou outras tecnologias em conjunto com a propulsão elétrica.

REFERÊNCIA BIBLIOGRAFICA

AMBROSIO, Renato Canha, and Edson Antonio Ticianelli. "Baterias de níquel-hidreto metálico, uma alternativa para as baterias de níquel-cádmio." *Quim. Nova* 24.2 (2001): 243-246.

ARAÚJO, Bruno José de Oliveira. *Desenvolvimento de um modelo de caracterização energética de ciclos de condução*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Área de concentração: Energia e Ambiente – Universidade do Moinho, 2015.

BAISDEN, Andrew C., and Ali Emadi. "ADVISOR-based model of a battery and an ultra-capacitor energy source for hybrid electric vehicles." *IEEE transactions on vehicular technology* 53.1 (2004): 199-205.

BARAN, Renato; LEGEY, Luiz Fernando Loureiro. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n.33, p. 207-224, mar. 2011.

BURKE, Andrew F. "Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles." *Proceedings of the IEEE* 95.4 (2007): 806-820.

CAPELLI, Alexandre. Inversores de Frequência. MECATRÔNICA ATUAL Nº 2 FEVEREIRO/2002. Disponível em <http://w3.ufsm.br/fuentes/index_arquivos/Inversores.pdf>. Acesso em 19.12.2016

CERCAL, Camile Thais da Rocha; LIMA, Helder Ruano de Souza; PEYERL, Kerri Michele. Projeto elétrico de plataforma móvel para o deslocamento de pessoas em escadas. 2014. 138 f. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Industrial Elétrica ênfase Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

EHSANI, Merhrdad; Yimin Gao; and Ali Emadi. *Modern electric, hybrid electric and fuel cells vehicles: Fundamentals, theory and design*. Boca Raton: CRC Press, 2010.

FRANCHI, Claiton Moro. "Inversores de frequência: teoria e aplicações." Editora Érica Ltda, 2ª edição, São Paulo (2009).

HUSAIN, Iqbal. *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*. CRC press, 2005.

JULIEN, C., Mauger, A., Vijn, A., & Zaghib, K. *Lithium batteries: Science and Technology*. Springer International Publishing, 2016.

KROEZE, Ryan C., and Philip T. Krein. "Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations." *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008*. IEEE. IEEE, 2008.

LARMINIE, James; LOWRY, Jonh. *Electric vehicle technology explained* / James Larminie, John Lowry. – Second Edition: WILEY, 2012.

LINDEN, David; REDDY, Thomas B. *Handbook of Batteries*, 4th Edition, McGraw Hill, NY, 2002

MANUAL WEG W22, 2016 – Manual do motor de indução WEG modelo W22. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22-motor-trifasico-tecnico-mercado-brasil-50023622-catalogo-portugues-br.pdf> . Acesso em: 06.06.2016

MANUAL CFW11, 2017 – Manual do inversor de frequência WEG CFW 11. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw-11-completo-10510201-catalogo-portugues-br.pdf> . Acesso em: 06.06.2016

MARKEL, Tony, Aaron Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, Kenneth Kelly, Bill Kramer, Michael O'Keefe, Sam Sprik, and Keith Wipke. Markel, Tony, et al. "ADVISOR: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling." *Journal of power sources* 110.2 : 255-266 (2002).

MELO, Rodnei Regis de. *Conversor CC-CC bidirecional intercalado aplicado a supercapacitores para veículos elétricos* / Rodnei Regis de Melo. – 2014.

MILLER, John M. *Ultracapacitor applications*. The Institution of Engineering and Technology, 2011.

MME, 2017 – Ministério de Minas Energia. Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/05/capacidade-instalada-de-geracao-de-energia-atinge-142-610-mw-em-marco> . Acesso em 17.01.2017

NESAMANI, K.S., SUBRAMANIAN, K.P. Development of a driving cycle for intra-city buses in Chennai, India. *Atmospheric Environment*, 45, p.5469-5476, 2011.

PONTES, R. S. (2009). Baterias de Chumbo. João Pessoa, jul 2009. Disponível em: http://www.quimica.ufpb.br/monitoria/Disciplinas/termodinamica2/material/M1_Baterias_de_chumbo_-_RONALDO_DA_SILVA_PONTES.pdf > . Acesso em: 24.12.2016.

PORTILHO, G., 2016, Quanto tempo vai durar o petróleo no mundo? *Revista Mundo Estranho*. Disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/ambiente/quanto-tempo-vai-durar-o-petroleo-no-mundo/>. Acesso em: 20.06.2016

RASHID, M.H. *Eletrônica de Potência: circuitos, dispositivos e aplicações*. Trad. Carlos Alberto Favato. Rev. técnica Antônio Pertence Júnior. São Paulo: Makron, 1999.

ROSOLEM, Maria de Fátima N. C., Beck, R. F., dos Santos, G. R., & Arioli, V. T. "Bateria de lítio-íon: conceitos básicos e potencialidades." *Cad. CPqD Tecnologia* 8.2 (2012): 59-72.

SILVA, Edna Lúcia da, and MENEZES, Estera Muszkat. "Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação." (2005).

SPERLING, Daniel. *Future drive: Electric vehicles and sustainable transportation*. Island Press, 2013.

TANAKA, Carlos Naomi. *Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos*. Diss. Universidade de São Paulo, 2013.

WESTBROOK, M.H. (Michael Hereward), *The electric car development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars – (IEE power series; no. 38)*: UK by TJ International Ltd, Padstow, 2007.

WILTUSCHNIG, Igor Pasa. "*Projeto e dimensionamento de um sistema de tração para veículos elétricos*." Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2016).

APÊNDICE A – ALTERAÇÕES NOS PARAMETROS DA SIMULAÇÃO

As modificações foram realizadas diretamente na janela de comando principal do Matlab, desta forma não foi necessária nenhuma linguagem de programação específica para a realização das modificações abaixo.

```

ADVISOR data file:  WH_SMCAR.m
%
% Data source:
%
% Data confirmation:
%
% Notes:
% Defines tire, wheel, and axle assembly parameters for use with ADVISOR 2,
for
% a hypothetical small car.
%
% Created on: 23-Jun-1998
% By:  MRC, NREL, matthew_cuddy@nrel.gov
%
% Revision history at end of file.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FILE ID INFO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
wh_description='Wheel/axle assembly for small car';
wh_version=2003; % version of ADVISOR for which the file was generated
wh_proprietary=0; % 0=> non-proprietary, 1=> proprietary, do not distribute
wh_validation=0; % 0=> no validation, 1=> data agrees with source data,
% 2=> data matches source data and data collection methods have been
verified
disp(['Data loaded: WH_SMCAR - ',wh_description])

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FORCE AND MASS RANGES over which data is defined
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% vehicle test mass vector used in tandem with "wh_axle_loss_trq" to
estimate
% wheel and axle bearing and brake drag
wh_axle_loss_mass=[0 2000]; % (kg)
% (tractive force on the front tires)/(weight on front axle), used in
tandem
% with "wh_slip" to estimate tire slip at any time
wh_slip_force_coeff=[0 0.3913 0.6715 0.8540 0.9616 1.0212]; % (--)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LOSS parameters
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% drag torque applied at the front (drive) axle, used with
"wh_axle_loss_mass"
wh_axle_loss_trq=[4 24]*.4; % (Nm)
% slip=(omega * r)/v -1; used with "wh_slip_force_coeff"

```

```

wh_slip=[0.0 0.025 0.050 0.075 0.10 0.125]; % (--)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% OTHER DATA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
wh_radius=0.282; % (m), rolling radius of 185/70R14 tire from a
                % ~1990 Saveiro 1991 Unitau
% rotational inertia of all wheels, tires, and axles
% below uses OTA's '94 estimate of Taurus wheel, tire & tool mass as mass
of
% solid cylinders of radius wh_radius, rotating at wheel speed in this
vehicle
wh_inertia=181/2.205*wh_radius^2/2; % (kg*m^2)
% fraction of braking done by driveline, indexed by wh_fa_dl_brake_mph
wh_fa_dl_brake_frac=[0 0 0.5 0.8 0.8]; % (--)
% (--), fraction of braking done by front friction brakes,
% indexed by wh_fa_fric_brake_mph
wh_fa_fric_brake_frac=[0.8 0.8 0.4 0.1 0.1]; % (--)
wh_fa_dl_brake_mph=[-1 0 10 60 1000]; % (mph)
wh_fa_fric_brake_mph=wh_fa_dl_brake_mph; % (mph)

wh_1st_rrc=0.009; % (--), rolling resistance coefficient
wh_2nd_rrc=0; % (s/m)

wh_mass=0;

% front or rear or both axles driving?
wh_front_active_bool=1; % 0==> inactive; 1==> active
wh_rear_active_bool=0; % 0==> inactive; 1==> active

% braking force limits
wh_max_front_brake_force=-inf;% (N)
wh_max_rear_brake_force=-inf;% (N)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Error checking
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% dl+fa_fric must add up to <= 1 for all speeds. Give user warning if in
error
temp_total_braking=wh_fa_dl_brake_frac+wh_fa_fric_brake_frac;
if any(temp_total_braking>1)
    disp('Warning: Driveline and Front Friction Braking need to add to less
than or equal to 1 for')
    disp('          all speeds. Please edit either wh_fa_dl_brake_frac or
wh_fa_fric_brake_frac');
    disp('          in WH_*.m. See Chapter 3.2.4, Braking of the
documentation for more info.');
```