

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

RAFAEL ANDRUSKI ALEIXO

**ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS
COM BASE NAS SUAS POSSÍVEIS CONFIGURAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2018**

RAFAEL ANDRUSKI ALEIXO

**ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS
COM BASE NAS SUAS POSSÍVEIS CONFIGURAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado(a) como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do Departamento de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador(a): Profa. Dra. Fernanda Cristina Corrêa

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO CONSUMO DE ENERGIA EM VEÍCULOS ELÉTRICOS COM BASE NAS SUAS POSSÍVEIS CONFIGURAÇÕES

por

RAFAEL ANDRUSKI ALEIXO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 16 de maio de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Fernanda Cristina Corrêa
Membro Titular

Prof. Dr. Frederic Conrad Jensen
Membro Titular

Prof. Dr. Edison Luiz Salgado Silva
Membro Titular

Prof. Dr. Josmar Ivanqui
Responsável pelos TCC

Prof(a). Dr(a). Jeferson José Gomes
Coordenador(a) do Curso

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

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço a Deus pela minha saúde e os diversos acontecimentos positivos em minha vida.

Aos meus pais, Armando e Josiane por me proporcionar a possibilidade de me dedicar integralmente ao curso, pela educação, suporte e incentivo perante as dificuldades encontradas ao longo de minha vida acadêmica.

A minha orientadora professora Dr.^a Fernanda Cristina Corrêa, que me mostrou os caminhos a serem seguidos, pela confiança depositada, ao conhecimento que me passou e principalmente pela dedicação em me ajudar.

Aos amigos que sempre me apoiaram e compartilharam conhecimento, e acima de tudo o valor que a amizade tem.

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

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

"Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, por que o mundo pertence a quem se atreve. E a vida é muito bela para ser insignificante." (CHAPLIN, Charles)

RESUMO

ALEIXO, Rafael. **Análise do consumo de energia em Veículos elétricos com base nas suas possíveis configurações** . 2018. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

Com o passar do tempo, a crescente frota de veículos de combustão interna tem sido um dos principais responsáveis pela degradação do meio ambiente, fato este que tem impulsionado pesquisas e desenvolvimento de tecnologias automotivas a fim de minimizar os danos ambientais ocasionados por esse setor. A principal delas é o veículo elétrico, que utilizando um ou vários motores elétricos, possui uma eficiência energética melhor do que quando comparado ao motor de combustão interna. Além disso, há diversos motores elétricos que podem ser utilizados para realizar a propulsão veicular e também diversas configurações em relação ao posicionamento dos motores. Desta forma, o proposto trabalho apresenta alternativas e configurações que melhor se ajustam aos veículos elétricos, proporcionando um gasto energético reduzido o que, conseqüentemente, causa um aumento na autonomia da bateria, fator que ainda é limitante neste tipo de veículo, para que se torne competitivo em relação aos veículos de combustão interna. Para se realizar o estudo de diferentes motores elétricos e configurações de veículos elétricos foi utilizada a ferramenta de simulação Advisor juntamente com o Simulink/Matlab, e os resultados obtidos neste trabalho mostram qual é o motor elétrico mais adequado para a aplicação e qual o melhor posicionamento dele dentro do veículo elétrico.

Palavras-chave: Veículos Elétricos. Motores Elétricos. Pontos de Eficiência. ADVISOR. Direto na Roda.

ABSTRACT

ALEIXO, Rafael. **Analysis of energy consumption in electric vehicles based on their possible configurations.** . 2018. 72 p. Thesis (Bachelor's Degree in Course Name) – Federal University of Technology – Paraná. Ponta Grossa, 2018.

In the course of time, the increasing fleet of internal combustion vehicle has been a major contributor to the degradation of the environment, this fact has promoted studies and development of automotive technologies in order to minimize the environmental damages caused by this sector. The main one is the electric vehicle, which uses one or several electric motors, it has a better energy efficiency than the internal combustion engine. Moreover, several models of electric motors can be used as a traction motor and there are several configurations regarding the position of the motors. Thus, this work presents alternatives and configurations that better adjust to the electric vehicles, providing a reduced energy expenditure and consequently, it causes an increase in battery autonomy, a factor that is still a limit in this kind of vehicle in order to it becomes competitive with internal combustion vehicles. The study of different models of the electric motor and different configurations of electric vehicles was performed on the Advisor simulation tool along with Simulink/Matlab and the results obtained in this work shows which is the most appropriate electric motor to the application and which is the best positioning of the motors in the electric car.

Keywords: Electric Vehicles. Electric Motors. Efficiency Points. ADVISOR. In Wheel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – "Le Jamais Contente"	21
Figura 2 – Porsche nº1 Lohner-Wagen.	21
Figura 3 – Linha de montagem do Renault Twitz no centro de pesquisa do programa VE, da Itaipu.	24
Figura 4 – E-delivery, o caminhão elétrico mundial da Volks-MAN, totalmente produzido no Brasil.	24
Figura 5 – Formas de posicionamento de motores elétricos em VEs.	26
Figura 6 – Circuito Elétrico Equivalente Simplificado de uma bateria.	27
Figura 7 – Critérios de dimensionamento de ME para VE.	32
Figura 8 – Tipos de Motores Elétricos	32
Figura 9 – Curvas de Torque e Potência de Motores Elétricos	33
Figura 10 – Mapa de um motor de Indução de 25kW.	33
Figura 11 – Sistema de coordenadas do veículo conforme SAE.	36
Figura 12 – Coeficiente adimensional de Resistência do ar.	40
Figura 13 – Tela de configurações do ADVISOR.	42
Figura 14 – Configuração Motor Central	44
Figura 15 – Configuração Motor na Roda	47
Figura 16 – Ciclo de Condução FTP.	51
Figura 17 – Mapa de Eficiência ME de Indução 60 kW.	53
Figura 18 – Mapa de Eficiência ME Síncrono de Ímãs Permanentes 60 kW.	54
Figura 19 – Mapa de Eficiência ME Síncrono de Ímãs Permanentes 30 kW.	56
Figura 20 – Mapa de Eficiência ME Síncrono de Ímãs Permanentes 15 kW.	57
Figura 21 – Velocidade e distância percorrida pelo VE utilizando Motor de Indução de 60 kW.	59
Figura 22 – Velocidade e distância percorrida pelo VE utilizando Motor de Ímãs Permanentes de 60 kW.	60
Figura 23 – Dados obtidos das baterias com Motor de Indução de 60 kW.	60
Figura 24 – Dados obtidos das baterias com Motor de Ímãs Permanentes de 60 kW.	61
Figura 25 – Resultados de Potência, Torque e Rotação requerida do Motor de Indução de 60 kW.	62
Figura 26 – Resultados de Potência, Torque e Rotação requerida do Motor de Ímãs Permanentes 60 kW.	62
Figura 27 – Pontos de operação do Motor de Indução de 60 kW.	62
Figura 28 – Pontos de operação do Motor de Ímãs Permanentes de 60 kW.	63
Figura 29 – Velocidade e distância percorrida pelo VE utilizando Motores de Ímãs Permanentes de 30 kW.	64
Figura 30 – Dados da bateria com Motores de Ímãs Permanentes 30 kW.	64
Figura 31 – Resultados de Potência, Torque e Rotação requerida do Motor de Ímãs Permanentes 30 kW.	65
Figura 32 – Pontos de operação do Motor de Ímãs Permanentes de 30 kW.	66
Figura 33 – Velocidade e distância percorrida pelo VE utilizando Motores de Ímãs Permanentes de 15 kW.	66
Figura 34 – Dados da bateria com Motores de Ímãs Permanentes 15 kW.	67

Figura 35 – Resultados de Potência, Torque e Rotação requerida do Motor de Ímãs Permanentes 15 kW.	68
Figura 36 – Pontos de operação do Motor de Ímãs Permanentes de 15 kW. . . .	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros Fixos do VE.	51
Tabela 2 – Características da Bateria	52
Tabela 3 – Relação de transmissão das Marchas	54
Tabela 4 – Massa dos Sistemas do VE Motor Central.	55
Tabela 5 – Massa dos Sistemas do VE FWD.	57
Tabela 6 – Massa dos Sistemas do VE AWD.	58

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

SIGLAS

ABVE	Associação Brasileira do Veículo Elétrico
ADVISOR	<i>Advanced Vehicle Simulator</i>
AWD	<i>All Wheel Drive</i>
BLDC	Sem Escovas de Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
CARB	<i>California Air Resources Board</i>
CC	Corrente Contínua
CG	Centro de Gravidade
FTP	<i>Federal Test Procedure</i>
FWD	<i>Front Wheel Drive</i>
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
MCI	Motor de Combustão Interna
ME	Motor Elétrico
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro
NiCAD	Níquel e Cádmio
NiMH	Hidreto Metálico de Níquel
PMSM	Síncrono de Imãs Permanentes
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos
SoC	<i>State of Charge</i>
VE	Veículo Elétrico

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

A	Área Frontal do Veículo	[m ²]
a_x	Aceleração Longitudinal do Veículo	[m/s ²]
C_a	Coefficiente adimensional de Resistência do Ar	
C_p	Capacidade de <i>Peukert</i>	
E	Tensão de Circuito Aberto	[V]
E_{bat}	Energia da bateria	[W]
f_r	Coefficiente de Resistência ao Rolamento	
F_t	Força de Tração	[N]
g	Aceleração da Gravidade	[m/s ²]
I_{bat}	Corrente da bateria	[A]
I_e	Inércia do Motor Elétrico	[kgm ²]
I_f	Inércia do Diferencial	
I_p	Inércia da Polia Redutora	[kgm ²]
I_t	Inércia da Caixa Redutora	[kgm ²]
I_w	Inércia da Rodas	[kgm ²]
k	Constante de <i>Perkeut</i>	
L	Comprimento	[m]
M	Massa do Veículo	[kg]
M_r	Massa da Carroceria	[kg]
N_f	Relação do Diferencial	
N_p	Relação da Polia Redutora	
N_t	Relação de Transmissão da Caixa Redutora	
N_{tf}	Relação de Redução Total	
P_{bat}	Potência da bateria	[W]
P_{ME}	Potência Dimensionada do Motor Elétrico	[W]
P_{req}	Potência Requerida	[W]
$Q(t)$	Quantidade de Carga	[Ah]
r	Raio da Roda	[m]
R_a	Resistência Aerodinâmica	[N]
R_g	Resistência de Inclinação	[N]
R_i	Resistência de Inércia	[N]
R_{int}	Resistência Interna da Bateria	[Ω]
R_r	Resistência de Rolamento	[N]
t	Tempo	[s]

T_c	Torque na Saída da Embreagem	[Nm]
T_d	Torque na Saída da Caixa Redutora	[Nm]
T_e	Torque no Motor Elétrico	[Nm]
T_r	Torque nas Rodas	[Nm]
V	Velocidade do Veículo	[m/s]
V_{bat}	Tensão entre os Terminais da Bateria	[V]
V_v	Velocidade do Vento	[m/s]
W	Peso do Veículo	[N]

LETRAS GREGAS

ρ_a	Densidade do Ar	[kg/m ³]
η_{tf}	Eficiência do Sistema de Transmissão	
η_{ME}	Eficiência do Motor Elétrico	
α_w	Aceleração Angular da Rodas	[rad/s ²]
α_e	Aceleração Angular do Motor Elétrico	[rad/s ²]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivo específico	17
1.1.3	Justificativa	17
1.2	ESCOPO DO TRABALHO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	HISTÓRICO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS	20
2.2	VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL	23
2.3	COMPONENTES DO VEÍCULO ELÉTRICO	25
2.3.1	Funcionamento de um Veículo Puramente Elétrico	25
2.3.2	Baterias	25
2.3.2.1	Tensão	26
2.3.2.2	Capacidade de Carga	27
2.3.2.3	Capacidade de <i>Peukert</i>	28
2.3.2.4	Densidade de Energia	28
2.3.2.5	Eficiência Energética	28
2.3.2.6	Estado da Carga	29
2.3.2.7	Potência Requerida da Bateria	30
2.3.2.8	Baterias de Ácido e Chumbo	30
2.3.2.9	Baterias à Base de Níquel	30
2.3.2.10	Baterias de Íon Lítio	31
2.3.3	Máquinas Elétricas	31
2.3.3.1	Motor Elétrico de Corrente Contínua com Escovas	33
2.3.3.2	Motor Elétrico de Indução	34
2.3.3.3	Motor Elétrico de Relutância Comutada	34
2.3.3.4	Motor Elétrico Sem Escovas de Corrente Contínua	34
2.3.3.5	Motor Elétrico Síncrono de Ímas Permanentes	35
2.3.4	Dinâmica Veicular	35
2.3.4.1	Forças de Resistência ao Movimento do Veículo	39
2.4	CICLO DE CONDUÇÃO	41
2.5	<i>Advanced Vehicle Simulator</i>	42
3	DIMENSIONAMENTO DO VEÍCULO ELÉTRICO	43
3.1	TIPOS DE CONFIGURAÇÃO DE SISTEMA DE TRAÇÃO	43
3.1.1	Sistema de Tração com ME central	43
3.1.1.1	Força de Aceleração	44
3.1.1.2	Força de Aceleração Linear	44
3.1.1.3	Força de Aceleração Angular	45
3.1.1.4	Força de Tração	45
3.1.1.5	Aceleração	46
3.1.1.6	Torque nas Rodas	46
3.1.1.7	Potência nas Rodas	46
3.1.1.8	Capacidade das Baterias	46
3.1.2	Sistema de Tração <i>In Wheel</i>	47

3.1.2.1	Força de Aceleração	48
3.1.2.2	Força de Aceleração Linear	48
3.1.2.3	Força de Aceleração Angular	48
3.1.2.4	Força de Tração	48
3.1.2.5	Aceleração	49
3.1.2.6	Torque nas Rodas	49
3.1.2.7	Potência nas Rodas	49
3.1.2.8	Capacidade das Baterias	50
3.2	PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	50
3.2.1	Parâmetros Fixos	50
3.2.2	Ciclo de Condução	51
3.2.3	Dimensionamento da Potência do ME	52
3.2.4	Dimensionamento do Sistema de Armazenamento	52
3.2.5	Parâmetros da Configuração Motor Central com Transmissão e Diferencial	53
3.2.5.1	Mapa de Eficiência do ME	53
3.2.5.2	Características da Transmissão e Diferencial	54
3.2.5.3	Massa de Carga	55
3.2.6	Parâmetros da Configuração <i>In wheel</i> nas Rodas Dianteiras	55
3.2.6.1	Mapa de Eficiência do ME	55
3.2.6.2	Características da Engrenagem de Redução	56
3.2.6.3	Massa de Carga	56
3.2.7	Parâmetros da Configuração <i>In wheel</i> em Todas as Rodas	57
3.2.7.1	Mapa de Eficiência do ME	57
3.2.7.2	Características da Engrenagem de Redução	57
3.2.7.3	Massa de Carga	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
4.1	CONFIGURAÇÃO MOTOR CENTRAL COM TRANSMISSÃO E DIFERENCIAL	59
4.1.1	Resultados do Ciclo de Condução	59
4.1.2	Resultados do Sistema de Armazenamento	60
4.1.3	Resultados dos Motores Elétricos	61
4.1.4	Pontos de Eficiência do ME	61
4.2	CONFIGURAÇÃO <i>In wheel</i> NAS RODAS DIANTEIRAS	63
4.2.1	Resultados do Ciclo de Condução	63
4.2.2	Resultados do Sistema de Armazenamento	64
4.2.3	Resultados dos Motores Elétricos	65
4.2.4	Pontos de Eficiência dos Motores Elétricos	65
4.3	CONFIGURAÇÃO <i>In wheel</i> EM TODAS AS RODAS	66
4.3.1	Resultados do Ciclo de Condução	66
4.3.2	Resultados do Sistema de Armazenamento	67
4.3.3	Resultados dos Motores Elétricos	67
4.3.4	Pontos de Eficiência dos Motores Elétricos	67
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	69
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

A constante necessidade de locomoção é considerada item básico na vida das pessoas, seja para levá-las a um lugar para lazer, tanto quanto para seu trabalho. Com o crescimento elevado da população e conseqüentemente da frota veicular, a procura por novas tecnologias automotivas tem ocorrido de forma intensa.

O conceito de veículo elétricos (VEs) não é algo recente, tendo surgido em meados do século 19. Mesmo após a introdução dos motores a combustão interna (MCI), os VEs permaneceram lado a lado por vários anos, especialmente nas áreas urbanas onde a autonomia das baterias era suficiente para os curtos trajetos e em função da capacidade de autopartida (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997).

Porém, com a produção em linha implementada por Henry Ford, alinhado com o avanço tecnológico em relação aos veículos de MCI, fez diminuir drasticamente a demanda por veículos elétricos, uma vez que possuíam uma autonomia limitada, além de desempenho inferior.

Mesmo as baterias eletroquímicas possuindo uma densidade energética inferior à gasolina, nos últimos anos tem sido resgatado o interesse pelo desenvolvimento dos VEs, podendo aumentar ainda mais perante uma crise petrolífera quanto ambiental (LARMINIE; LOWRY, 2012).

Os graves efeitos para o meio ambiente, como poluição, aquecimento global, e esgotamento das reservas de petróleo, tem como principal agente o crescente número de automóveis que possuem MCI, causando uma grande dependência dos derivados do petróleo, criando uma situação crítica, pois a disponibilidade desse combustível é limitada, gerando instabilidade no preço e conflitos internacionais (EHSANI; RAHMAN; TOLIYAT, 1997).

Com o grave quadro de poluição ambiental, veio a tona a necessidade de um controle rigoroso para emissão de poluentes, para que houvesse uma diminuição na emissão de gases tóxicos e economia de combustível, porém mesmo com as leis de controle de poluentes, os combustíveis fósseis empregados em automóveis de combustão interna são um sério problema ambiental.

Em contrapartida, automóveis com energia renovável tem se destacado, dentre eles os VEs, sendo que esses veículos utilizam um sistema de bateria para o arma-

zenamento de energia na forma de eletricidade, e assim o motor elétrico transforma essa energia elétrica para energia mecânica realizando a propulsão do veículo.

Contudo, os VEs ainda estão em desenvolvimento, em busca de uma melhor autonomia, diminuindo as perdas e custos, aumentando assim sua eficiência, para que se tornem competitivos perante os veículos com MCI.

Para o desenvolvimento e aperfeiçoamento, estudos de modelagem matemática analisando a dinâmica veicular como um todo, são indispensáveis, visto que os recursos computacionais atualmente possibilitam uma simulação em que as variáveis responsáveis pela movimentação do veículo comportam-se de maneira semelhante à realidade, como é o exemplo do software *Advanced Vehicle Simulator*.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Análise da eficiência energética de um VE com base no posicionamento e tipo do motor elétrico, visando o aumento da autonomia da bateria.

1.1.2 Objetivo específico

Estudo da dinâmica longitudinal do VE utilizando três diferentes configurações: posicionamento do motor elétrico central, dois motores elétricos acoplados diretamente nas rodas dianteiras e quatro motores elétricos acoplados diretamente em todas as rodas do veículo.

Estudo e utilização da ferramenta *Advanced Vehicle Simulator* (ADVISOR) juntamente com o Simulink/Matlab, para simulação e análise do consumo energético utilizando-se as três configurações anteriormente citadas.

1.1.3 Justificativa

As normas regulamentadoras de poluição cada vez mais forçam as indústrias automotivas que utilizam combustíveis fósseis a reduzir a emissão de poluentes.

Após a crise econômica mundial muitos países aproveitaram os pacotes de benefícios para incentivar a pesquisa e produção dos VEs. Há cinco principais ações

de incentivo governamental, sendo eles: bônus aos compradores, desconto de tributos, adoção de restrição ao uso de veículos convencionais, auxílio à pesquisa e implantação de infraestrutura (CASTRO; FERREIRA, 2010).

Porém o fator limitante enfrentado pelas indústrias de VE é a autonomia da bateria, impactando diretamente na venda desses veículos, pois o usuário de um veículo com MCI que possui uma autonomia maior dificilmente trocaria por um VE que terá que ser carregado várias vezes em um pequeno percurso.

O motor elétrico é o principal responsável pelo gasto energético em um VE. Esses motores possuem diversos pontos de operação, que dependem do torque e rotação de operação, trazendo uma boa ou má eficiência energética. Caso o ME opere em melhores pontos de eficiência, ocasionará a diminuição do gasto de energia, aumentando a autonomia da bateria, bem como a sua vida útil. Desta forma, realizando-se um controle adequado do torque e da rotação de operação do motor elétrico, consegue-se colocar o motor elétrico para operar em pontos de melhor eficiência.

1.2 ESCOPO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

- O capítulo 2 contempla de uma maneira geral um breve histórico dos VEs em âmbito mundial e brasileiro, os principais componentes integrantes do sistema veicular, o ciclo de condução e a ferramenta de simulação que será utilizada para se realizar as análises necessárias.
- O capítulo 3 aborda o equacionamento da dinâmica longitudinal de um VE, considerando-se os mapas de operação dos MEs utilizados, tipos de configurações e os parâmetros de simulação.
- O capítulo 4 expõe os resultados obtidos de todas as configurações simuladas e analisadas, identificando os pontos de operação do ME, assim como isso impacta na autonomia da bateria.
- Por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões provenientes desse trabalho, e indica as melhorias que podem ser realizadas com a finalidade de aumentar

ainda mais a autonomia do VE.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Com o aumento da crise ambiental, o VE é considerado uma alternativa para o grande crescimento da utilização de veículos com MCI, uma vez que não possui emissão de poluentes e pode ser produzido em larga escala, buscando ajudar a reverter o quadro ambiental em que o mundo se encontra.

Este capítulo tem por finalidade apresentar um breve histórico dos VEs, os seus principais componentes, descrevendo sobre o funcionamento de cada um deles e seu sistema dinâmico.

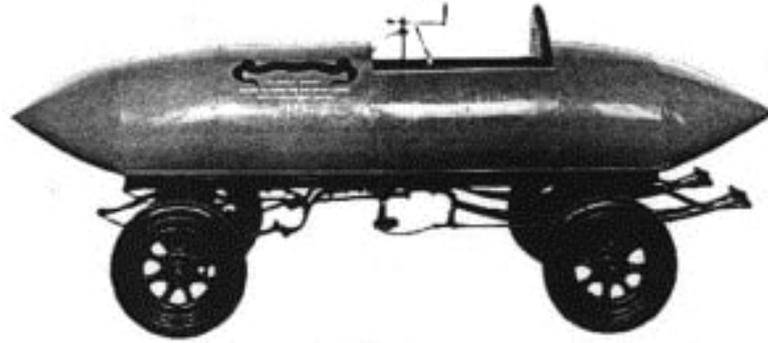
2.1 HISTÓRICO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

A propulsão elétrica está intimamente ligada a descoberta da bateria e do motor elétrico, empregado no sistema de tração. Em 1800 Alessandro Volta criou a primeira bateria conhecida como bateria de Volta. Posteriormente em 1831, Michael Faraday descobriu a indução magnética, demonstrando a relação entre magnetismo e corrente elétrica, possibilitando a consolidação da tecnologia de motores e geradores elétricos.

Até 1859 não havia tecnologia para VE, devido a não existir um equipamento que fizesse o armazenamento de energia. Com a descoberta das baterias de chumbo-ácido os primeiros VEs começaram a surgir. Em 1881, a Paris Onibus Company lançou o primeiro VE. Em 1891 W. Morrison construiu o primeiro veículo elétrico com repercussão, que foi levado à uma competição, num percurso de 80 km entre Chicago e Evanston, não chegando na primeira colocação devido a uma forte nevasca durante a corrida. Já em 1898, durante um percurso de mil metros, atingira 63 km/h de velocidade média. No ano seguinte o belga Camille Jenatzy superou esta marca com a velocidade de 106 km/h com o veículo chamado “Le Jamais Content” (Figura 1), que possuía a forma de um torpedo. Em 1902, Charles Baker atingiu a marca de 137 km/h, graças aos avanços tecnológicos implementados em seu veículo, quase alcançado o recorde mundial da época, porém foi impedido devido um problema mecânico que o tirou da competição (AMARAL et al., 1998).

Em 1900, Ferdinand Porsche fabricou carros elétricos, em particular o Pors-

Figura 1 – "Le Jamais Contente"



Fonte: Ferreira et al. (2014).

che No.1 Lohner-Wagen (Figura 2) com dois motores elétricos acoplados às rodas dianteiras, sendo uma das fábricas inovadoras no período. Pouco depois, no ano de 1914, Henry Ford produziu um carro para uso próprio, possuía autonomia de 50 km e 32 km/h de velocidade.

Figura 2 – Porsche nº1 Lohner-Wagen.



Fonte: Lopes (2008).

Uma das características que marcaram esse tipo de automóvel era a não emissão de fumaça espessa que os MCI emitiam nessa época, além disso apresentavam ruído e trepidação baixo. Devido ao fato de dirigibilidade e conforto maior, esses VEs eram a opção das classes sociais mais altas.

Após o ano 1912 foi quando aconteceu a ascensão dos veículos com MCI e o declínio do uso dos VEs, sendo que o último modelo antes da era moderna foi produzido em 1921, nos EUA. Posteriormente, a tração elétrica foi pouco explorada, voltando a ser estudada em meados dos anos 60, em que foi utilizado como alternativa para os problemas ambientais causados pelos veículos de MCI. Além disso, nessa

época os VEs produzidos eram resultados da conversão de veículos convencionais (LOPES, 2008).

Após 1973, é demarcada a volta de pesquisas e a fabricação de VE para aplicação rodoviária em âmbito mundial, depois de estar em desuso por volta de 50 anos. Isso se dá em relação a crise petrolífera, que teve um aumento demasiado no preço, deixando claro a fragilidade da dependência desse tipo de combustível fóssil (BARASSA et al., 2015).

Por volta de 1980 os governos de vários países tiveram a visão de que a propulsão elétrica traz muitas vantagens devido a não emissão de poluentes, realizando programas de desenvolvimento de VEs, como financiamento oficial. O programa que mais se destacou foi o Ford/GE, que através do patrocínio do Departamento de Energia dos EUA criou o modelo ETX-1 com avançado sistema de propulsão com corrente alternada e baterias de chumbo-ácido. Ainda nessa época, houveram grandes avanços em tecnologia de baterias, inversores e motores elétricos. Outros programas como no Reino Unido em que foram isentos os impostos de pequenos VEs e na França, com a produção de 500 VEs para uso experimental também tiveram destaques (CORRÊA et al., 2013).

Posteriormente, na Califórnia, por volta de 1990, um mandado do órgão *California Air Resources Board* (CARB) estipulava que até 1998, 2% da frota de veículos vendidos por montadoras que superavam a marca de 35.000 unidades vendidas deveriam ser de veículos com zero emissão de poluentes. Com a regra em vigor, em 2001 subiu para 5 % e dois anos após, em 2003, subiu para 10%. Fazendo-se assim as maiores fabricantes na indústria automobilística investirem em novas tecnologias em VEs (WESTBROOK, 2001).

Em 2007, foi implementado nos Estados Unidos o *Energy Independence na Security Act*, que visava incentivar a pesquisa e desenvolvimento de transporte elétrico e formação de profissionais especializados em VE e Veículos Elétricos Híbridos Plug-in (VEHP). Além disso, buscava a redução da dependência do petróleo e o aumento na produção de automóveis que utilizam energia renovável (BARAN, 2012).

Pouco tempo depois, uma lei chamada *America Clean Energy and Security Act*, determinou que os órgãos Secretaria de Energia, Agência reguladora estadual e distribuidoras de energia não reguladas deveriam possuir planos de desenvolvimento de Redes Inteligentes integradas, tendo assistência à tecnologia VHEP até julho de

2012 (BARAN, 2012).

Contudo, as matrizes energéticas de petróleo estão cada vez mais se esgotando e poluindo o meio ambiente devido a queima de combustível. Por mais que a eficiência dos veículos com MCI aumente, a queima sempre será efetuada, lançando gases nocivos à atmosfera. Como já mencionado, uma ótima alternativa como solução do problema de locomoção e o não maior agravamento do meio ambiente são os VEs.

2.2 VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL

A indústria automobilística brasileira teve um início tardio, por volta de 1950, apenas implementando pacotes de peças opcionais que vinham importados para serem instalados na frota brasileira, com isso até a década de 1990 a engenharia das montadoras adequava os carros de acordo com as condições físicas, climáticas e do combustível comercializado do Brasil (CASOTTI; GOLDENSTEIN, 2008).

No final da década de 1970, a Gurgel S.A em conjunto com a Furnas Centrais Elétricas S.A desenvolveu dois modelos de carros elétricos, marcando a primeira tentativa de uma alta produção de VEs. Porém, devido ao não incentivo por parte do governo brasileiro, os automóveis tiveram um custo de produção elevado e possuíam uma autonomia baixa, fazendo com que não fossem competitivos no mercado brasileiro (BORBA, 2012).

Já em 2006, a Itaipu Binacional em conjunto com a Fiat, Kraftwerke Oberhasli e outras instituições entre Brasil, Paraguai e Suíça, desenvolveram protótipos de VEs. No primeiro ano foram produzidas mais de 80 unidades, a partir do modelo Palio Weekend, com autonomia de 100 quilômetros e com velocidade máxima de 110 km/h, utilizando baterias de sódio, níquel e cádmio.

O programa da Itaipu se estendeu ao decorrer dos anos, e em 2014 teve a parceria da Renault, em que foi realizada a produção de 32 VEs do modelo Twitz (Figura 3), tendo como principal foco a nacionalização dos componentes empregados nos mesmos (BINACIONAL, 2015).

Outra iniciativa brasileira foi o caminhão elétrico da Volkswagen-MAN em parceria com a Eletra e WEG, apresentado em outubro de 2017. O *e-Delivery* (Figura 4), possui uma plataforma nova para alternativa de mobilidade nas grandes cidades. Com a potência de 80 kW, autonomia de 200 km e podendo levar até 11 toneladas e subir

Figura 3 – Linha de montagem do Renault Twitz no centro de pesquisa do programa VE, da Itaipu.



Fonte: Binacional (2015)

ruas de até 30° de inclinação (ELÉTRICOS, 2018).

Figura 4 – E-delivery, o caminhão elétrico mundial da Volks-MAN, totalmente produzido no Brasil.



Fonte: <http://www.abve.org.br/caminhao-eletrico-da-volks-man-e-vitoria-da-tecnologia-nacional/>

Até o momento no Brasil, os VEs não possuem tratamento diferenciado com relação a impostos, como no caso do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) que tem alíquota de 25 %, sendo a mais elevada devido a categoria em que se enquadra chamada de “outros”. Alguns acordos para a redução desses impostos e o incentivo para o aumento de mercado estão em discussão, que segundo a Associação Brasileira do Veículo Elétrico é o maior empecilho para que haja competitividade perante aos veículos com MCI. Um dos que mais teve repercussão é a rota 2030, que impõe diversos itens para a diminuição da poluição e o aumento dos recursos em prol do VE (ELÉTRICOS, 2018).

O sistema de transporte brasileiro possui grande dependência petrolífera por ser rodoviário, e que segundo (BORBA, 2012), os países que ainda estão em de-

envolvimento, como o Brasil, não possuem esse sistema maduro e irão sofrer um crescimento relevante nos próximos anos. Com isso vem o fato da necessidade de uma expansão com qualidade e eficiência, conhecendo as particularidades do setor, planejando e escolhendo assim a melhor alternativa para a evolução.

2.3 COMPONENTES DO VEÍCULO ELÉTRICO

Um VE puro, tem como fonte propulsora os motores elétricos, com ímãs permanentes ou de indução, e como fonte energética, as baterias. Para o fornecimento de energia de forma eficiente, o VE também utiliza conversores para que a tensão e corrente elétrica cheguem até as bobinas do ME de maneira controlada.

2.3.1 Funcionamento de um Veículo Puramente Elétrico

Segundo Tanaka (2013), os VEs puros possuem algumas características marcantes, como o silêncio na rodagem, manutenção simples, podem desenvolver alto torque em baixa rotação, provocam menos fadiga ao motorista e quando estão parados e os motores não magnetizam, ou seja, não consomem energia das baterias.

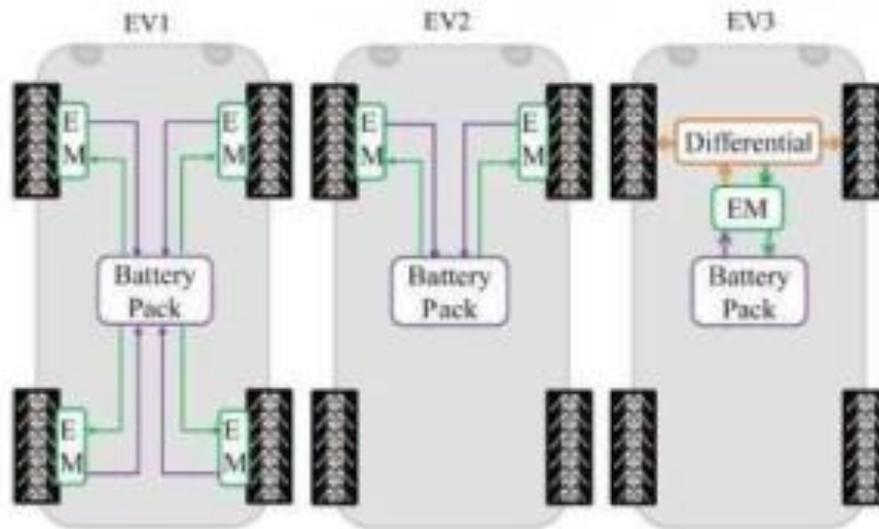
Com relação as configurações de acoplamentos de motores, usualmente são empregados dois tipos (Figura 5), o *in-wheel* que é o termo empregado para motores que são diretamente acoplados nas rodas, não possuindo diferencial. A outra maneira é um motor central em que é acoplado um diferencial transmitindo potência para as rodas.

Quando são utilizados motores acoplados diretamente na roda, podem-se utilizar engrenagens planetárias, de forma a aumentar o torque e reduzir a velocidade, realizando o papel da caixa redutora no caso de motores centrais.

2.3.2 Baterias

Para o funcionamento de VE é imprescindível o uso de dispositivos armazenadores de energia, que para o dimensionamento de um VE é a parte que possui maior volume, peso e custo (LARMINIE; LOWRY, 2012). Esse dimensionamento da capacidade de armazenamento deve seguir alguns requisitos impostos pelas características físicas do veículo, fornecendo a potência necessária para o movimento do veículo.

Figura 5 – Formas de posicionamento de motores elétricos em VEs.



Outros fatores importantes na hora de se realizar a escolha da bateria de um VE é a tensão, eficiência energética, quantidade de ciclos de carga e recarga das células e densidade energética das mesmas.

As baterias consistem em células eletroquímicas que realizam a conversão da energia química armazenada para energia elétrica. Cada célula possui eletrodos positivo e negativo unidos por um eletrólito responsável pela condução dos íons entre os eletrodos e o separador, que faz a divisão física das diferentes polaridades. Nas etapas de carga e descarga, ocorrem as reações químicas de oxidação e redução, resultando na adição ou remoção de íons. No caso das baterias recarregáveis, essa reação é revertida através da inversão de corrente elétrica, retornando a um certo estado de carga (SoC) (REVOREDO, 2007).

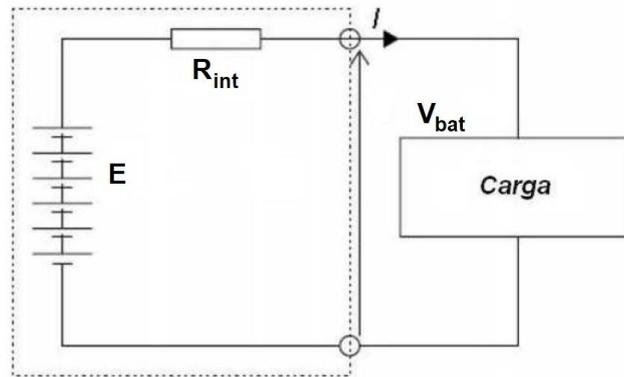
2.3.2.1 Tensão

De uma maneira simplificada, a bateria pode ser representada de acordo com a Figura 6, em que a tensão de circuito aberto é E , R_{int} a resistência interna e a tensão entre os terminais da bateria é V_{bat} .

Pelo estado da carga da bateria, a tensão pode variar de acordo com a corrente elétrica solicitada. A resistência no circuito representa uma perda devido ao aumento da corrente entre os terminais da bateria.

Analisando o circuito é possível encontrar a tensão nos pólos da bateria de

Figura 6 – Circuito Elétrico Equivalente Simplificado de uma bateria.



Fonte: Adaptado de Revoredo (2007).

acordo com a Equação 1:

$$V_{bat} = E - R_{int}I \quad (1)$$

2.3.2.2 Capacidade de Carga

A capacidade de carga de uma bateria normalmente é definida em Ampères-hora (Ah), uma vez que a unidade do sistema internacional de unidades (Coulomb) é muito pequena, representando o fluxo de apenas um Ampère em um segundo, o que é uma quantidade de energia muito baixa para aplicações tais como veículos elétricos. A quantidade de Ampères-hora denota o número de horas que uma bateria é capaz de fornecer 1 Ampère de corrente. Normalmente os fabricantes de baterias com grande capacidade de carga, que são implementadas nos VEs, especificam o tempo de descarga de 5 horas (CORRÊA et al., 2013).

Logo se, a capacidade nominal de uma bateria é de 20 Ah, em 5 h ela é capaz de fornecer ininterruptamente 4 A, sendo que ao final desse tempo ela estará totalmente descarregada. Para uma estimativa mais simples e usual, utiliza-se de uma referência denominada de Capacidade de Peukert, definida posteriormente neste capítulo.

2.3.2.3 Capacidade de Peukert

Utilizando como base de tempo de descarga (t) e uma capacidade de carga de referência (C) para os quais a bateria foi especificada, calcula-se o tempo de descarga real da bateria em função da corrente drenada pela carga através do cálculo de uma capacidade de carga de referência constante, chamada de Capacidade de Peukert, dada pela Equação 2 (CORRÊA et al., 2013).

$$C_p = (I_{bat})^k t \quad (2)$$

Em que, I_{bat} é a corrente solicitada pela carga e k uma constante chamada de Coeficiente de Peukert. Uma vez conhecida a Capacidade de Peukert, que pode ser obtida através da capacidade e do tempo de descarga de acordo com as especificações do fabricante, pode-se encontrar o tempo de descarga à uma solicitação de corrente qualquer (CORRÊA et al., 2013).

2.3.2.4 Densidade de Energia

A densidade de Energia basicamente é a quantidade de energia armazenada por unidade de volume ou massa em Wh/m^3 . A quantidade de energia de uma bateria é obtida através da multiplicação de capacidade de carga (C) em Ah e a tensão (V) em Volts, como mostra a Equação 3 (REVOREDO, 2007).

$$Energia = VC \quad (3)$$

Para o dimensionamento de um projeto a densidade de energia da bateria é um parâmetro relevante, pois para obter a capacidade de energia basta dividir a quantidade de energia pela densidade de carga (CORRÊA et al., 2013).

2.3.2.5 Eficiência Energética

A quantidade de energia que a bateria pode fornecer e a quantidade de energia que foi utilizada para carregá-la é a relação que mostra a eficiência da mesma. De uma maneira ideal, a bateria que fornecer ao veículo a mesma quantidade energética

que foi fornecida para carregá-la, entretanto na prática isso não acontece (REVOREDO, 2007).

Existem vários fatores para isso não acontecer e de fato, os mais relevantes são a temperatura de operação, taxa de carga, tipo da bateria e o estado da carga. (REVOREDO, 2007).

2.3.2.6 Estado da Carga

Para obter a equação do estado da carga, o ponto de partida é a carga que pode ser removida em um intervalo de tempo δ_t através de corrente I_{bat} solicitada à bateria, elevada ao exponencial da constante de *Peukert* (k), como mostra a Equação 4 (LARMINIE; LOWRY, 2012).

$$Q_t = \delta_t * (I_{bat})^k \quad (4)$$

Sendo δ_t em segundos, a carga total removida da bateria após n instantes de tempo, Q_n , em Ah, obtém-se a Equação 5 (CORRÊA et al., 2013).

$$Q_n = Q_{n-1} + \frac{\delta_t * (I_{bat})^k}{3600} \quad (5)$$

Considerando a equação em tempo contínuo e fazendo δ_t tendendo a 0, pode-se reescrever a equação conforme a Equação 6, chegando na quantidade de carga retirada da bateria em um dado intervalo de tempo (CORRÊA et al., 2013).

$$Q_t = \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} I_{bat}^k dt \quad (6)$$

Para obter o estado da carga da bateria utiliza-se a Equação 7, em que C é a capacidade máxima de carga da bateria (CORRÊA et al., 2013).

$$SoC = 1 - \frac{1}{3600} \int_{t_1}^{t_2} \frac{I_{bat}^k}{C} dt \quad (7)$$

Assim, integrando a corrente elétrica no intervalo de tempo de descarga, resulta na quantidade de energia retirada da bateria. Os valores de SoC são baseados entre 0 e 1, sendo que 1 é a energia máxima da bateria.

2.3.2.7 Potência Requerida da Bateria

No caso de VEs, quando o motor elétrico se movimentar, uma potência P_{bat} será fornecida pela bateria, descrita pela equação geral da potência (Equação 8).

$$P_{bat} = V_{bat}I_{bat} \quad (8)$$

Aplicado a Equação 1 com a Equação 8 é obtida a Equação 9, e isolando I_{bat} , encontra-se a corrente solicitada pelo ME(Equação 10) (CORRÊA et al., 2013).

$$P_{bat} = (E - R_{int}I_{bat})I_{bat} = EI_{bat} - RI_{bat}^2 \quad (9)$$

$$I_{bat} = \frac{-E + \sqrt{E^2 + 4RP_{bat}}}{2R} \quad (10)$$

2.3.2.8 Baterias de Ácido e Chumbo

Esse tipo de bateria é a mais aplicada e conhecida em VEs, pois são as recarregáveis mais baratas por quilowatt-hora de carga. Porém, não são indicadas para VEs que percorrem longas distâncias devido a sua baixa energia específica. A sua utilização é indicada para Veículos Elétricos Híbridos, pois somente uma quantidade limitada de energia é armazenada, entretanto liberada e absorvida rapidamente (LOPES, 2008).

A energia específica dessas baterias giram em torno de 20 a 35 Wh/kg, potência específica de aproximadamente 250 W/kg e ciclos de vida acima de 800 para 80% de capacidade (LOPES, 2008).

2.3.2.9 Baterias à Base de Níquel

Possuem uma grande variedade de combinações, porém as mais relevantes são a base de Níquel e Cádmiio (NiCad) e a de Hidreto Metálico de Níquel (NiMH), descritas abaixo.

As baterias de Níquel e Cádmiio além de apresentarem uma alta energia e potência específica, tem um longo ciclo de vida, fatores que são muito importantes para os VEs. Esse tipo de bateria pode ser recarregada dentro de uma hora, e ope-

ram em uma grande margem de temperatura, de -40°C até $+80^{\circ}\text{C}$ (LOPES, 2008). Porém a tensão de cada célula é apenas 1,2V por célula, com isso para uma tensão elevada deve-se associar diversas células, elevando o custo. Outra desvantagem é que o Cádmio é nocivo ao meio ambiente (LOPES, 2008).

As baterias de Hidreto Metálico de Níquel possuem um desempenho mais elevado do que as de Níquel e Cádmio, além de não ter a toxicidade do cádmio ao meio ambiente. As baterias de NiMH estão entre as mais avançadas no que diz respeito à aplicação em VEs, podendo fornecer uma energia específica maior que 70 Wh/kg e potências de 200 w/kg. Contudo esse tipo de bateria é considerada uma das mais favoráveis para o futuro dos VEs (LOPES, 2008).

2.3.2.10 Baterias de Íon Lítio

A energia específica da bateria de Íon Lítio é quase 3 vezes maior em relação a de chumbo-ácido, e pode fornecer uma autonomia maior. Apresentam também uma potência específica próximo a 120 kW/kg, 1000 ciclos de carga e descarga e baixo custo de produção. Com isso, as características citadas acima tornam esse tipo de bateria altamente atrativa para aplicações em VEs (LOPES, 2008).

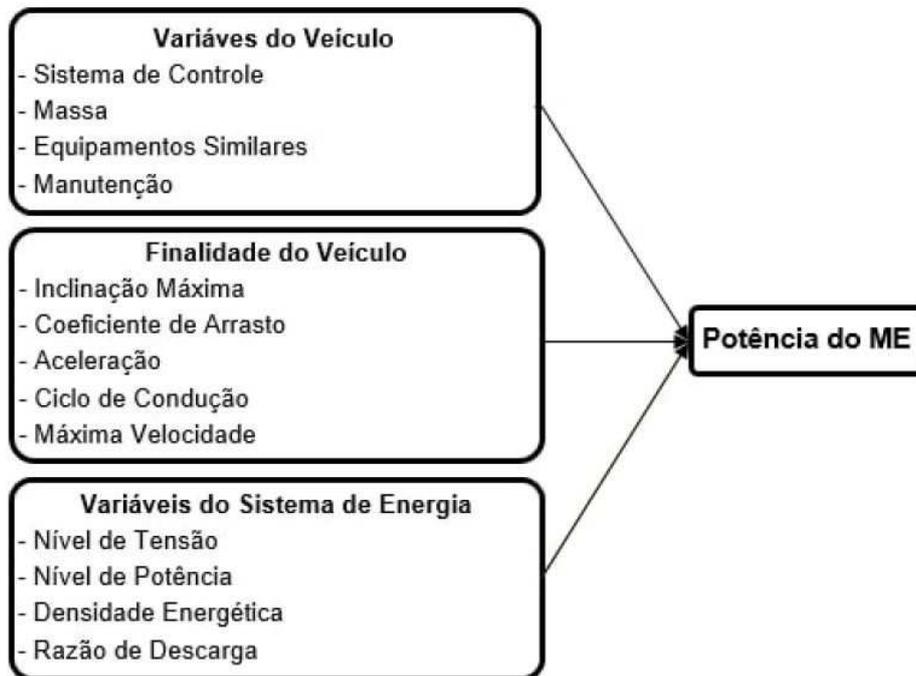
2.3.3 Máquinas Elétricas

A função principal de um motor elétrico é a conversão energética, aplicando uma tensão e corrente, é produzido torque. Porém, também pode operar de maneira contrária, funcionando como gerador, recarregando as baterias. No caso de VE puro a aplicação exige um bom dimensionamento, seguindo alguns critérios apresentados na Figura 7.

O motores elétricos são classificados de acordo com a Figura 8 em que se diferenciam pela presença ou não de escovas e pela tensão, sendo contínua ou alternada. Para os motores que possuem escovas existe somente o motor de corrente contínua (DC), já para os que não têm escovas, são classificados como Indução, Corrente contínua sem Escovas (BLDC), e Imãs Permanentes Síncronos (PMSM) e Relutância Magnética Variável, que serão explicados com maiores detalhes posteriormente.

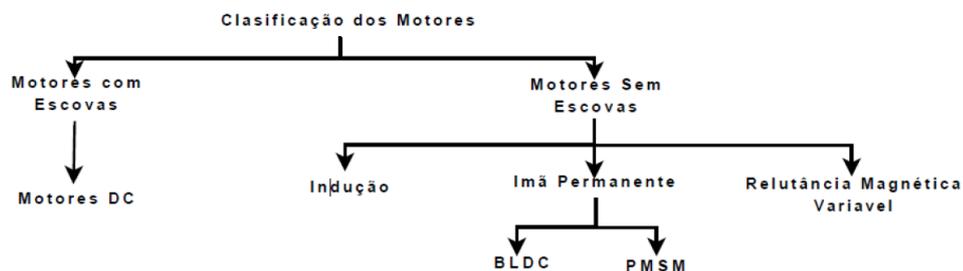
Existem diversos tipos de motores elétricos, porém todos os tipos tem com-

Figura 7 – Critérios de dimensionamento de ME para VE.



Fonte: Rodrigues (2017)

Figura 8 – Tipos de Motores Elétricos

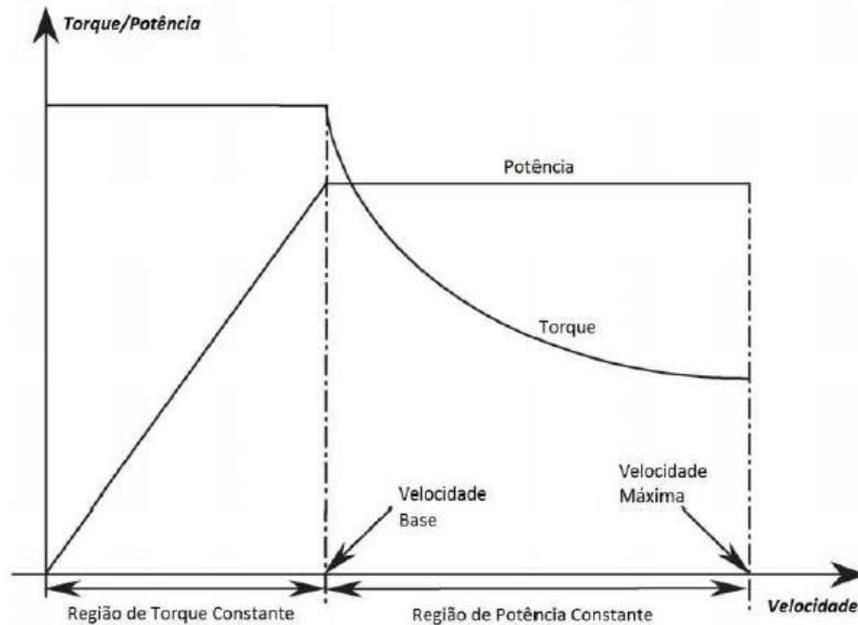


Fonte: Corrêa et al. (2013)

portamento semelhante no que se refere a potência e torque, como mostrado na Figura 9. A distribuição do torque em relação a velocidade inicialmente é linear e decai exponencialmente entre sua velocidade base e a velocidade máxima de operação do motor. Já a potência cresce linearmente até a velocidade base, tornando-se linear até a velocidade máxima do motor.

Um fator importante após a escolha da potência do motor é saber a faixa de rotação que o mesmo irá operar, analisando a opção que oferecerá a eficiência dentro da faixa de rotação. A Figura 10 mostra o mapa de um motor elétrico onde mostra as regiões de eficiência de acordo com a rotação e o torque. Pode-se observar que há uma grande diferença de eficiência dentro de toda faixa de operação do motor, e

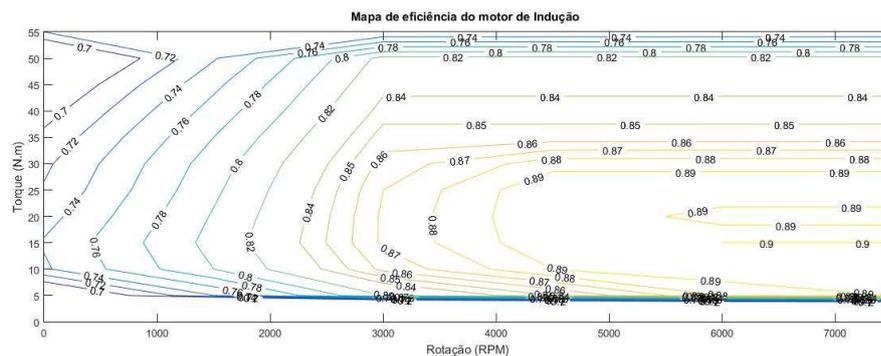
Figura 9 – Curvas de Torque e Potência de Motores Elétricos



Fonte: Zeraouia, Benbouzid e Diallo (2006)

para os VEs puros influenciará diretamente na autonomia e tempo de descarga da bateria. Por isso o posicionamento do ME é relevante pois, sua faixa de rotação irá mudar de acordo com seu acoplamento, se diretamente nas rodas ou com diferencial e redutores.

Figura 10 – Mapa de um motor de Indução de 25kW.



2.3.3.1 Motor Elétrico de Corrente Contínua com Escovas

O motor elétrico de corrente contínua possui potência e torque que atendem a demanda em VE e o controle da sua velocidade é simples. Uma característica marcante é devido ao torque alto em baixas velocidades, e sua velocidade por sua vez é controlada pela variação da tensão. A quantidade de polos podem variar de dois até

seis, dependendo da potência de saída e da tensão do enrolamento de campo em série ou derivação (BENTO, 2015).

Entretanto possuem um volume alto, baixa eficiência e por possuir escovas, requerem manutenção. As maiores desvantagens na utilização em um VE é o atrito entre as escovas e o comutador que limita a velocidade máxima de operação do motor (BENTO, 2015).

2.3.3.2 Motor Elétrico de Indução

O motor de indução opera em corrente alternada, com isso não são utilizadas escovas e comutador, tendo a capacidade de atingir maiores velocidades do que o ME de corrente contínua. Sua forma construtiva é simples, tem custo razoável e baixa manutenção. O controle de velocidade nesse tipo de motor é realizado através da variação da frequência da tensão aplicada (ZERAOUZIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006).

2.3.3.3 Motor Elétrico de Relutância Comutada

O motor elétrico de relutância comutada possui uma construção simples, e com baixa inércia no rotor, oferecendo uma alta dinâmica e um torque alto na partida. Com a estrutura de rotor básica, não possuindo enrolamento, ímã, escovas e comutadores, a sua tolerância é baixa. Porém, a desvantagem desses motores é que sofrem ondulação no torque e apresentam ruído acústico, mas mesmo assim não é restringido o uso destes motores nos VEs (XUE; CHENG; CHEUNG, 2008).

2.3.3.4 Motor Elétrico Sem Escovas de Corrente Contínua

Com o Motor BLDC, pode-se eliminar a aplicação de tensão e corrente para a produção de pólos magnéticos, e como consequência, é possível alcançar uma eficiência maior do que os outros motores (ZERAOUZIA; BENBOUZID; DIALLO, 2006). Este tipo de motor requer dispositivos com alta potência nos controladores de velocidade, implicando em controladores mais caros. Além disso, sua potência em VE é limitada, pois a medida que a potência do ME é aumentada, o volume e a massa se tornam elevados.

2.3.3.5 Motor Elétrico Síncrono de Ímas Permanentes

Os Motores PMSM, possuem uma faixa de potência adequada para a aplicação em VEs, em torno de 100 W até 100 kW, estes motores são muito indicados pois possuem uma eficiência alta pois não é requerida potência durante o funcionamento para indução de corrente no rotor (LOPES, 2008).

A sua razão de peso/potência é acima de 3 kW/kg sendo menores do que os motores de indução. O fator limitante para o uso deste tipo de motores é o custo dos ímãs de terra rara ou neodímio-ferro-boro (NdFeB), que utilizados na fabricação e a eletrônica complexa para os controladores (LOPES, 2008).

2.3.4 Dinâmica Veicular

A dinâmica veicular tem por finalidade modelar matematicamente as forças atuantes na movimentação longitudinal, mostrando as relações de causa-efeito entre o motorista, veículo e o solo.

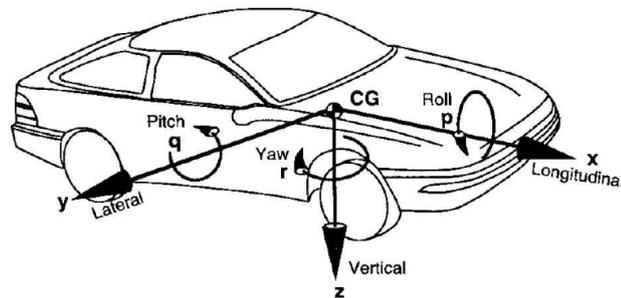
Tal modelamento exige algumas variáveis de entrada, as especificações do veículo, como peso e resistências de rolamento e do ar. E por último as especificações individuais, como perda na transmissão e no diferencial. Já a análise é realizada verificando se a dirigibilidade, velocidade, aceleração e SoC foram atendidos (CORRÊA et al., 2013).

A dinâmica veicular é dividida em três segmentos, sendo a Dinâmica longitudinal, vertical e lateral, representadas na Figura 11, para uma análise do movimento do veículo, utiliza-se um sistema de coordenadas ortogonal, com origem no centro de gravidade (CG). Este modelo de análise é adotado pela SAE (*Society of automotive engineers*).

Na Figura 11 pode-se observar que:

- x - movimentos longitudinais, positivos para a frente do veículo;
- y - movimentos laterais, positivos para o lado direito do veículo;
- z - movimentos verticais, positivos para baixo em relação ao veículo;
- p - velocidade de rolagem (*roll*) em torno do eixo x ;

Figura 11 – Sistema de coordenadas do veículo conforme SAE.



Fonte: Gillespie (1992)

- q - velocidade de arfagem (*pitch*) em torno do eixo y ;
- r - velocidade guinada (*yaw*) em torno do eixo z ;

Para uma análise elementar da dinâmica longitudinal e lateral, o veículo pode ser representado como um corpo rígido com centro de gravidade, considerando a movimentação simultânea de todos os componentes do veículo. Já para a dinâmica vertical, a suspensão do veículo é considerada como uma massa individual (CORRÊA et al., 2013).

Para a obtenção da aceleração a partir do torque fornecido pelo ME, segundo (GILLESPIE, 1992) são feitas algumas simplificações, como:

- Os eixos da roda e do motor são corpos rígidos e com massa constante;
- Não há folga e deslizamento no contato entre os eixos através do diferencial;
- As variações das grandezas do sistema são relativamente pequenas, a fim de manter o comportamento do sistema praticamente linear;

A aceleração longitudinal é limitada por dois fatores, a potência do motor para velocidades altas e a tração entre pneu e a pista para baixas velocidades. Para velocidades e acelerações médias, a aceleração é descrita pela segunda lei de Newton, desprezando as resistências de movimento.

$$Ma_x = F_x \quad (11)$$

$$a_x = \frac{1}{M} F_x \quad (12)$$

em que:

- M = Massa do veículo [kg];
- F_x = Força de tração aplicada pelas rodas e solo [N];
- a_x = Aceleração longitudinal do veículo [m/s^2];

Para um veículo com motor central e com transmissão, o torque que estará disponível na entrada da transmissão é:

$$T_c = T_e - I_e a_e \quad (13)$$

em que:

- T_c = Torque na saída da embreagem [Nm];
- T_e = Torque no ME [Nm];
- I_e = Inércia do ME [kgm^2];
- a_e = Aceleração angular do ME [rad/s^2];

E o torque de saída da transmissão é dado pela Equação 14:

$$T_d = (T_c - I_t a_e) N_t \quad (14)$$

onde:

- T_d = Torque na Saída da Caixa Redutora [Nm];
- I_t = Inércia da Caixa Redutora [kgm^2];
- N_t = Relação de Transmissão da Caixa Redutora;

O torque gerado pelo ME é aumentado pela transmissão e diferencial, porém ambos mecanismos possuem uma eficiência menor que 100%.

Com isso, o torque nas rodas é dado pela Equação 15:

$$T_r = F_t r + I_w a_w \quad (15)$$

onde:

- T_r = Torque nas Rodas [Nm];
- F_t = Força de Tração [N];
- r = Raio da Roda [m];
- I_w = Inércia das Rodas [kgm^2];
- a_w = Aceleração Angular das Rodas [rad/s^2];

E a força de tração disponível no contato pneu e solo é definida pela Equação 16, já com as perdas da transmissão.

$$F_t = \frac{T_e N_{tf} \eta_{tf}}{r} - ((I_e + I_t) N_{tf}^2 + I_f N_f^2 + I_w) \frac{a_x}{r^2} \quad (16)$$

onde:

- N_{tf} = Relação de redução total (caixa redutora + diferencial);
- N_f = Relação do diferencial;
- I_t = Inércia da transmissão;
- I_f = Inércia do diferencial;
- η_{tf} = eficiência do sistema de transmissão;

Por fim, com a força de tração conhecida, é possível realizar a estimativa da aceleração do veículo, porém deve-se modelar as forças de resistência ao movimento, agindo de maneira oposta a força de tração. A Equação 17 mostra as resistências consideradas, sendo a resistência de rolamento, atrito e de inclinação, abordadas na próxima seção.

$$M a_x = \frac{W}{g} a_x = F_x - R_r - R_a - R_i - R_g \quad (17)$$

onde:

- R_r = Resistência ao rolamento [N];
- R_a = Resistência Aerodinâmica [N];
- R_i = Resistência de Inércia [N];
- R_g = Inclinação Longitudinal da Pista [N];

2.3.4.1 Forças de Resistência ao Movimento do Veículo

As forças de resistência ao movimento são divididas em quatro grupos, sendo a resistência ao rolamento, aerodinâmica, forças de inércia e a inclinação longitudinal da pista.

A resistência de rolamento depende somente do peso do veículo (W) e do coeficiente de resistência ao rolamento (f_r), de acordo com a Equação 18.

$$R_r = f_r W \quad (18)$$

O coeficiente de resistência ao rolamento depende de vários fatores, tais como tipo de solo, pressão interna do pneus, temperatura, carga radial dos pneus, e para baixas velocidades pode ser obtido através da Equação 19, em que V é a velocidade do veículo em km/h (GILLESPIE, 1992).

$$f_r = 0,01 \left(1 + \frac{0,62V}{100} \right) \quad (19)$$

A força aerodinâmica é função da velocidade relativa do veículo frente à velocidades do ar, agindo no sentido contrário do movimento (GILLESPIE, 1992). Essa força depende da densidade do ar (ρ), do coeficiente adimensional de resistência do ar (C_a), da área (A) frontal do veículo e da velocidade do vento (V_v), como mostra a Equação 20.

$$R_a = \frac{1}{2} \rho_a C_a A (V - V_v)^2 \quad (20)$$

O coeficiente adimensional de resistência do ar é definido de acordo com a geometria do veículo, como mostrado na Figura 12.

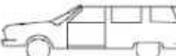
A resistência de inclinação longitudinal da pista é dada pela multiplicação do peso do veículo e o seno do ângulo de inclinação (θ).

$$R_g = W \text{sen}(\theta) \quad (21)$$

Geralmente na literatura é encontrada a inclinação em porcentagem, e para ângulos pequenos, é assumido que $\text{sen}(\theta) \approx \tan(\theta)$ logo resulta em:

$$G = 100 \tan(\theta) \quad (22)$$

Figura 12 – Coeficiente adimensional de Resistência do ar.

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

Fonte: Mehrdad, Yimin e Ali (2010)

onde G é a inclinação longitudinal do pavimento em porcentagem.

$$R_g = W \sin(\theta) \approx W \tan(\theta) = \frac{WG}{100} \quad (23)$$

Para o cálculo das forças de inércias atuantes no sistema veicular, deve-se considerar as inércias rotativas, pois na aceleração do veículo elas podem ser responsáveis por uma parte do consumo de potência quando submetidas a acelerações angulares proporcionais a linear, devido às relações de transmissão do diferencial (CORRÊA et al., 2013).

Sabendo-se que para acelerar uma massa M de uma quantidade a_x deve-se aplicar uma força e essa força é necessária ser colocada a disposição do veículo através do motor, correspondendo a resistência de inércia de translação (R_{I1}), de acordo com a Equação 24.

$$R_{i1} = M a_x \quad (24)$$

A outra força inercial do sistema é da transmissão, uma vez que possui mas-

sas girantes, representadas pela Equação 25.

$$R_{i2} = ((I_e + I_t)N_{tf}^2 + I_f N_f^2 + I_w) \frac{a_x}{r^2} \quad (25)$$

Assim, somando a Equação 24 e Equação 25 chega-se a resistência inercial total, onde I_w é a inércia da roda.

$$R_i = M a_x + ((I_e + I_t)N_{tf}^2 + I_f N_f^2 + I_w) \frac{a_x}{r^2} \quad (26)$$

Através dessa modelagem de forças, é possível realizarem-se cálculos de potência mecânica, visto que a força multiplicada pela velocidade em que o veículo está e considerando a eficiência dos sistemas mecânicos, obtém-se a potência de tração ou potência requerida (Equação 27).

$$P_{req} = \frac{V(t)}{N_{tf} \eta_{tf} \eta_{ME}} [M a_x + f_r W + \frac{1}{2} \rho_a C_a A (V - V_v)^2 + ((I_e + I_t)N_{tf}^2 + I_d N_f^2 + I_w) \frac{a_x}{r^2} + W \text{sen}(\theta)] \quad (27)$$

2.4 CICLO DE CONDUÇÃO

Como pode-se analisar nas equações da dinâmica veicular, elas dependem das variáveis de velocidade e aceleração para um determinado percurso. Em ambiente de simulação, as características levadas em consideração, são a velocidade, aceleração, tipo de pavimento e topologia geográfica (ativo ou declive).

Esses percursos padrões são chamados de ciclos de condução, que foram projetados com veículos instrumentados de maneira a armazenar dados reais da condição da pista. Um ciclo de condução geralmente é referido através de uma tabela de velocidade e tempo, em que esse tempo é dado em segundos e a velocidade em km/h ou mph.

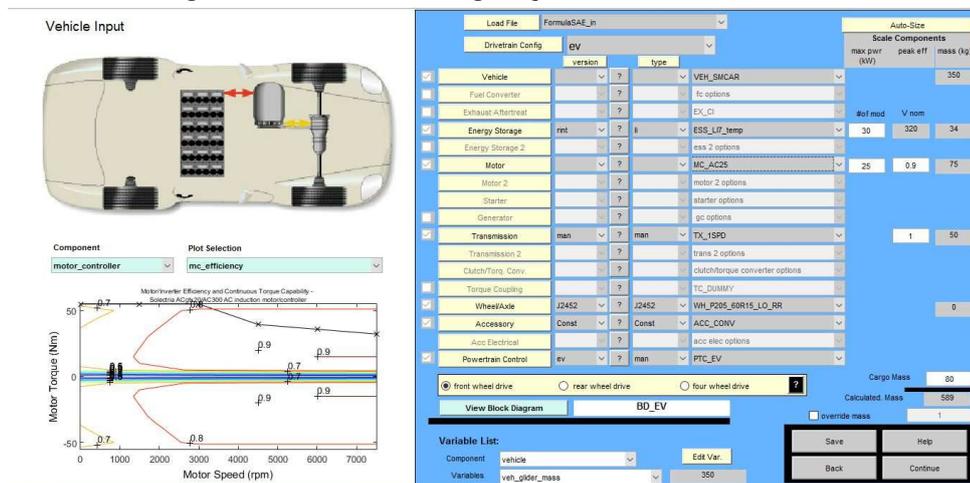
Com isso a velocidade em um intervalo de tempo é uma função linear do tempo, logo, conhecendo-se a velocidade e aceleração pode-se determinar o comportamento da dinâmica veicular.

2.5 ADVANCED VEHICLE SIMULATOR

O *Advanced Vehicle Simulator* (ADVISOR) é uma ferramenta de simulação que engloba as modelagens matemáticas de diversos tipos de veículos, podendo ser veículos convencionais, híbridos ou puramente elétricos Figura 13.

Criado no ambiente MATLAB/ Simulink, é uma poderosa ferramenta que tem sido muito empregada na indústria. Segundo Markel et al. (2002) 68% dos usuários são da área industrial e cerca de 29% são da academia. Esses dados mostram o quanto a ferramenta é realística e de resultados confiáveis para esse tipo de aplicação.

Figura 13 – Tela de configurações do ADVISOR.



Fonte: Mehrdad, Yimin e Ali (2010)

Através do ADVISOR pode-se extrair o comportamento dos diversos subsistemas que compõem o VE, como os pontos de operação, torque e potência requerida do ME, o estado da carga, tensão e corrente da bateria, dentre outras informações que serão necessárias para se obter qual melhor configuração para um VE.

3 DIMENSIONAMENTO DO VEÍCULO ELÉTRICO

A energia contida nas baterias passa por um conversor em que é feito o ajuste de corrente e tensão, e chega até o ME, onde é transformada em energia mecânica no eixo do rotor, que por sua vez fornece a tração necessária para o veículo se locomover. Em alguns casos, enquanto o ME não está tracionando, ele pode vir a ser um gerador nos momentos de frenagem, fornecendo energia elétrica para recarregar as baterias, uma estratégia adotada para aumentar a autonomia do VE.

Um VE tem obrigatoriamente motor(es) elétrico(s), conversor de potência e armazenadores de energia como partes constituintes do sistema de tração. Já a transmissão e diferencial são componentes que dependendo da configuração, podem ou não existir.

De uma maneira simplificada, para o dimensionamento e simulação apresentados neste trabalho foi considerada apenas a modelagem da dinâmica longitudinal.

3.1 TIPOS DE CONFIGURAÇÃO DE SISTEMA DE TRAÇÃO

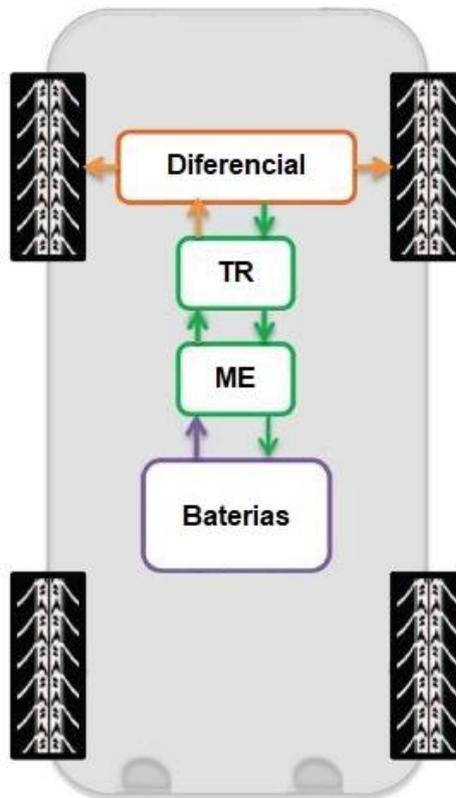
Os VEs tem diversas configurações que podem ser empregadas em relação ao posicionamento do ME em seu interior. Os dois tipos de configuração para o sistema de tração mais utilizados são com o ME central e com os MEs acoplados diretamente nas rodas.

3.1.1 Sistema de Tração com ME central

Assim como os veículos com MCI, os VEs puros possuem uma configuração mecânica que constitui em ME, transmissão e diferencial (Figura 14), onde o torque do rotor do ME é conectado a uma transmissão com polias escalonadas a fim de amplificar ou diminuir esse torque, que por consequência diminui ou aumenta a velocidade de rotação aplicada no diferencial. O diferencial possui uma relação de transmissão fixa e conecta o torque na saída da caixa de redução com as rodas.

Em aplicações utilizando esse tipo de configuração é possível dimensionar motores com potência menor, devido ao fato da transmissão amplificar o torque de saída do motor. Porém, em certos casos o motor pode operar em regiões com uma

Figura 14 – Configuração Motor Central



eficiência baixa, causando um maior consumo energético.

Para um dimensionamento correto relacionado à posição do ME no VE, primeiramente é necessário o equacionamento da dinâmica veicular, mostrado a seguir.

3.1.1.1 Força de Aceleração

A força de aceleração pode ser obtida através da consideração da força de aceleração linear e da força de aceleração angular, de maneira semelhante à descrita na seção da dinâmica veicular.

3.1.1.2 Força de Aceleração Linear

A aceleração linear ou Longitudinal é a taxa de variação da velocidade em um dado intervalo de tempo, e que nesse caso, a velocidade é uma função linear do

tempo, logo a Equação 28 representa a aceleração linear.

$$a_x = \frac{dV(t)}{dt} \quad (28)$$

A lei de Newton impõe que para se alterar o estado do movimento, seja repouso ou retilíneo uniforme, precisa ser aplicada uma força que será somada às forças de resistência ao movimento, obtendo a aceleração linear do veículo, de acordo com a Equação 29.

$$F_{al} = M \frac{dV(t)}{dt} \quad (29)$$

3.1.1.3 Força de Aceleração Angular

Para o cálculo da força de aceleração, é necessária a consideração da força necessária para acelerar as partes girantes do sistema conforme a Equação 30.

$$F_{aw} = ((I_e + I_t)N_{tf}^2 + I_f N_f^2 + I_w) \frac{a_x}{r^2} \quad (30)$$

3.1.1.4 Força de Tração

Considerando as forças de aceleração e das resistências ao movimento, chega-se na força de tração necessária (Equação 31).

$$F_t = F_r + F_w + F_g + F_{al} + F_{aw} \quad (31)$$

Que resulta em:

$$F_t = f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a C_a A (V - V_v)^2 + M g \sin(\alpha) + \frac{M dV(t)}{dt} + \frac{((I_e + I_t)N_{tf}^2 + I_f N_f^2 + I_w)}{r^2} \frac{dV(t)}{dt} \quad (32)$$

3.1.1.5 Aceleração

Através da Equação 32, é possível isolar a força de aceleração linear, onde é obtida a aceleração, como mostra a Equação 34.

$$F_{al} = F_t - (F_r + F_w + F_g + F_{aw}) \quad (33)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{F_t - [f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a C_a A (V - V_v)^2 + M g \sin(\alpha)]}{[M + \frac{((I_e + I_t) N_{tf}^2 + I_d N_f^2 + I_w)}{r^2}]} \quad (34)$$

3.1.1.6 Torque nas Rodas

Para se obter o torque nas rodas no veículo, deve-se considerar o raio da roda, multiplicando-o pela força de tração e considerando a eficiência e a relação do sistema de transmissão e diferencial, chega-se na Equação 35.

$$T_r = \frac{r}{\eta_{ME} \eta_{tf} N_{tf}} (f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a C_a A (V - V_v)^2 + M g \sin(\alpha) + \frac{M dV(t)}{dt} + \frac{((I_e + I_t) N_{tf}^2 + I_f N_f^2 + I_w)}{r^2} \frac{dV(t)}{dt}) \quad (35)$$

3.1.1.7 Potência nas Rodas

A potência nas rodas do veículo é dada pelo produto da função velocidade com a força de tração (Equação 36), essa potência de maneira semelhante à força de tração deve ser levada em conta a eficiência do motor e da transmissão.

$$P_{req} = \frac{V(t)}{\eta_{ME} \eta_{tf} N_{tf}} (f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a C_a A (V - V_v)^2 + M g \sin(\alpha) + \frac{M dV(t)}{dt} + \frac{((I_e + I_t) N_{tf}^2 + I_f N_f^2 + I_w)}{r^2} \frac{dV(t)}{dt}) \quad (36)$$

3.1.1.8 Capacidade das Baterias

A capacidade das baterias é um fator importante para o dimensionamento da autonomia do VE, uma vez que é a única fonte de energia do sistema. Para o cálculo

da quantidade da capacidade é levado em conta a energia gasta para realizar um determinado percurso imposto pelo ciclo de condução.

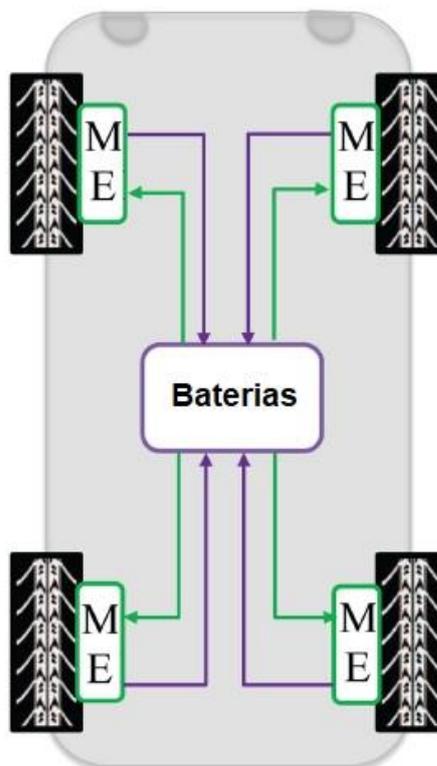
Integrando toda a potência requerida nas rodas é obtido a energia demandada do banco de baterias (Equação 37), considerando um veículo sem sistema de regeneração de energia.

$$E_{bat} = \int_{tra\cacao} P_{tot} dt \quad (37)$$

3.1.2 Sistema de Tração *In Wheel*

O sistema de tração *in wheel* consiste em acoplar o ME diretamente na roda, eliminando os sistemas de transmissão e diferencial. Com isso, o controle de velocidade do motor é equivalente ao controle da velocidade da roda, que conseqüentemente será a velocidade do veículo.

Figura 15 – Configuração Motor na Roda



Nesta configuração, um problema enfrentado é no momento da partida, em que é exigido um torque elevado, então deve-se utilizar MEs com essa característica de alto torque em baixas rotações. Além disso, também é possível acoplar engrena-

gens planetárias no rotor, que implicará no aumento do torque, reduzindo a velocidade final na roda.

O equacionamento da dinâmica veicular para este sistema é um pouco diferente do que a configuração com motor central, devido a ausência da transmissão e do diferencial. A seguir são apresentados os equacionamentos para esta configuração.

3.1.2.1 Força de Aceleração

De maneira semelhante à configuração anterior, a força de aceleração é obtida através da consideração da força de aceleração linear e da força de aceleração angular.

3.1.2.2 Força de Aceleração Linear

A lei de Newton, descreve que para a alteração do estado do movimento, precisa ser aplicada uma força que será somada às forças de resistência ao movimento, obtendo a aceleração linear do veículo, de acordo com a Equação 29.

$$F_{al} = M \frac{dV(t)}{dt} \quad (38)$$

3.1.2.3 Força de Aceleração Angular

A principal diferença nos cálculos será nas partes girantes do sistema, chamada de aceleração angular, descrita na Equação 39.

$$F_{aw} = (I_e + I_p N_p^2 + I_w) \frac{a_x}{r^2} \quad (39)$$

3.1.2.4 Força de Tração

A força de tração necessária (Equação 40) é a soma de todas as forças atuantes no sistema que são opostas ao movimento, ou seja, para que o veículo cumpra o percurso, o ME deverá suprir esta força de tração.

$$F_t = F_r + F_w + F_g + F_{al} + F_{aw} \quad (40)$$

De outra maneira, a Equação 41 mostra as variáveis envolvidas para o cálculo.

$$F_t = f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a C_a A (V - V_v)^2 + M g \sin(\alpha) + \frac{M dV(t)}{dt} + \frac{(I_e + I_p N_p^2 + I_w) dV(t)}{r^2} \quad (41)$$

3.1.2.5 Aceleração

Isolando a força de aceleração linear, na Equação 41 e realizando algumas manipulações matemáticas, obtém-se a aceleração, como mostra a Equação 43.

$$F_{al} = F_t - (F_r + F_w + F_g + F_{aw}) \quad (42)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{F_t - [f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a C_a A (V - V_v)^2 + M g \sin(\alpha)]}{[M + \frac{(I_e + I_p N_p^2 + I_w)}{r^2}]} \quad (43)$$

3.1.2.6 Torque nas Rodas

O torque nas rodas é obtido pela multiplicação do raio da roda pela força de tração, considerando a eficiência do motor elétrico, como mostra a Equação 44.

$$T_r = \frac{r}{\eta_{ME}} (f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a C_a A (V - V_v)^2 + M g \sin(\alpha) + \frac{M dV(t)}{dt} + \frac{(I_e + I_p N_p^2 + I_w) dV(t)}{r^2}) \quad (44)$$

3.1.2.7 Potência nas Rodas

Através da força de tração (Equação 45), multiplicada pela função velocidade, resulta na potência requerida nas rodas, levando em conta a eficiência do motor.

$$P_{req} = \frac{V(t)}{\eta_{ME} N_p} (f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a C_a A (V - V_v)^2 + M g \sin(\alpha) + \frac{M dV(t)}{dt} + \frac{(I_e + I_p N_p^2 + I_w) dV(t)}{r^2}) \quad (45)$$

3.1.2.8 Capacidade das Baterias

Como o equacionamento é diferente, a energia demandada no banco de baterias ao longo do tempo, também será diferente, logo integrando a potência de tração, resulta na energia total demandada do banco de baterias.

$$E_{bat} = \int_{tracao} P_t dt \quad (46)$$

3.2 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Os parâmetros de simulação envolvem características de projeto específicas para a proposta do trabalho, sendo que alguns desses foram fixados com finalidade de ressaltar certos comportamentos do sistema tracionário.

Os parâmetros que não variam conforme a configuração que será analisada, estão denotados na subseção 3.2.1, 3.2.2, 3.2.3, 3.2.4. Posteriormente, nas subseções, 3.2.5, 3.2.6 e 3.2.7 serão discutidos os parâmetros variáveis de cada tipo de configuração.

3.2.1 Parâmetros Fixos

As características físicas do VE implicam diretamente na magnitude dos valores de força, potência e torque do sistema tracionário, e com isso, na autonomia.

Os principais parâmetros para a realização dos cálculos são área frontal, raio da roda, aceleração da gravidade e densidade do ar, que são valores fixos independentemente do sistema tracionário. A Tabela 1 mostra os dados levando em conta um veículo *hatch* de uso urbano, já visando uma melhor mobilidade e autonomia.

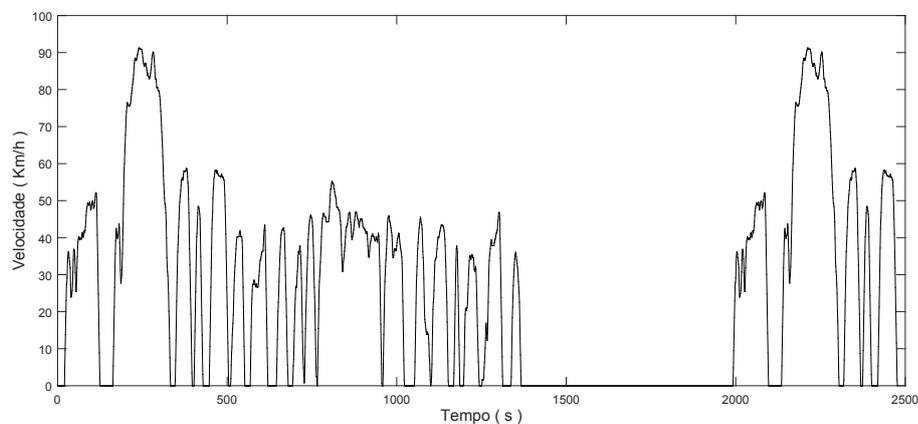
A massa total do VE será um parâmetro fixo e de acordo com as configurações as massas dos sistemas serão diferentes, devido a alteração dos motores, sistema de transmissão e diferencial. A variável que irá fazer com que a massa total do VE permaneça fixa é a massa de carga, que é simplesmente uma carga adicionada ao VE.

Tabela 1 – Parâmetros Fixos do VE.

Dados do Projeto	Símbolo	Valor	Unidade
Massa da carroceria	M_c	592	kg
Coef. de Resistência de Rolamento	f_r	0,0015	Adimens.
Coef. Aerodinâmico	C_a	0,25	Adimens.
Área Frontal do Veículo	A	2,53	m^2
Momento de Inércia das Rodas/Pneus	I_w	1,33	$kg.m^2$
Momento de Inércia da Transmissão	I_t	0,0017	$kg.m^2$
Momento de Inércia do Diferencial	I_f	9,22E-04	$kg.m^2$
Momento de Inércia do ME	I_e	0,1367	$kg.m^2$
Raio Dinâmico do Pneu	r	0,3302	m
Aceleração da Gravidade	g	9,81	m/s^2
Densidade do ar	ρ_a	1,25	kg/m^3

3.2.2 Ciclo de Condução

Em simulações de dinâmica veicular, é interessante obter-se resultados em ambientes agressivos, buscando conhecer quais são os limites e os fatores que impedem o aumento de desempenho do sistema, por isso o ciclo escolhido para realizar todas as simulações foi o FTP, representado na Figura 16.

Figura 16 – Ciclo de Condução FTP.

O ciclo de condução FTP possui curvas de aceleração bem agressivas e uma variabilidade de velocidade, ou seja, trechos com baixa velocidade, representando o perímetro urbano e trechos com altas velocidades, representando marginais ou estradas. A extensão é de 17,7 km, com pico de aceleração de $1,48 m/s^2$, velocidade máxima de 91,25 km/h e neste caso, como se trata de uma simulação apenas longitudinal, não possui inclinação.

3.2.3 Dimensionamento da Potência do ME

Para uma melhor análise dos resultados, optou-se por fixar o valor de potência elétrica total, tornando os pontos de eficiência uma variável determinante no gasto energético do sistema de armazenamento.

Para se obter o valor de potência do ME, é preferível considerar a pior hipótese possível em que o ciclo irá impor ao veículo, utilizando a aceleração e a velocidade máxima informada na subseção anterior e relação igual 1. Para obter a potência elétrica, utiliza-se a Equação 47 considerando-se valor de eficiência do ME de 0,73, que é um valor baixo de eficiência para ME aplicados em VE. Substituindo os valores da Tabela 1 na Equação 47 e realizando-se os cálculos, obtém-se o valor aproximado de 60 kW, sendo o valor padrão de potência para todas as simulações.

$$P_{ME} = \frac{V}{\eta_{ME}} \left(f_r M g \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a C_a A V^2 + M g \sin(\alpha) + \frac{M dV(t)}{dt} + \frac{((I_e + I_f + I_w) dV(t))}{r^2} \frac{dV(t)}{dt} \right) \quad (47)$$

$$P_{ME} \approx 60kW$$

3.2.4 Dimensionamento do Sistema de Armazenamento

O sistema de armazenamento foi constituído de células de íon lítio, devido a sua alta densidade energética, gerando uma menor massa agregada ao veículo. Ao todo foram conectadas 84 células, 28 em série e 3 em paralelo. A Tabela 2 mostra os dados da bateria por célula, com a associação série, a tensão chegou a 300 V, e em paralelo a capacidade chegou a 18 Ah.

Tabela 2 – Características da Bateria

Dados Por Célula	Valor	Unidade
Capacidade	6	Ah
Tensão de Circ. Aberto	11,6	V
Resistência Interna (0C)	0,043	Ohms

Para o VE em questão, os valores foram bem dimensionados, suportando mais de uma vez o ciclo de condução completo, atendendo as acelerações e velocidades impostas, pois como intuito é evidenciar qual configuração terá uma autonomia maior,

é imprescindível que a bateria tenha uma duração de mais de um ciclo para que possa ser feita uma análise com respostas concretas.

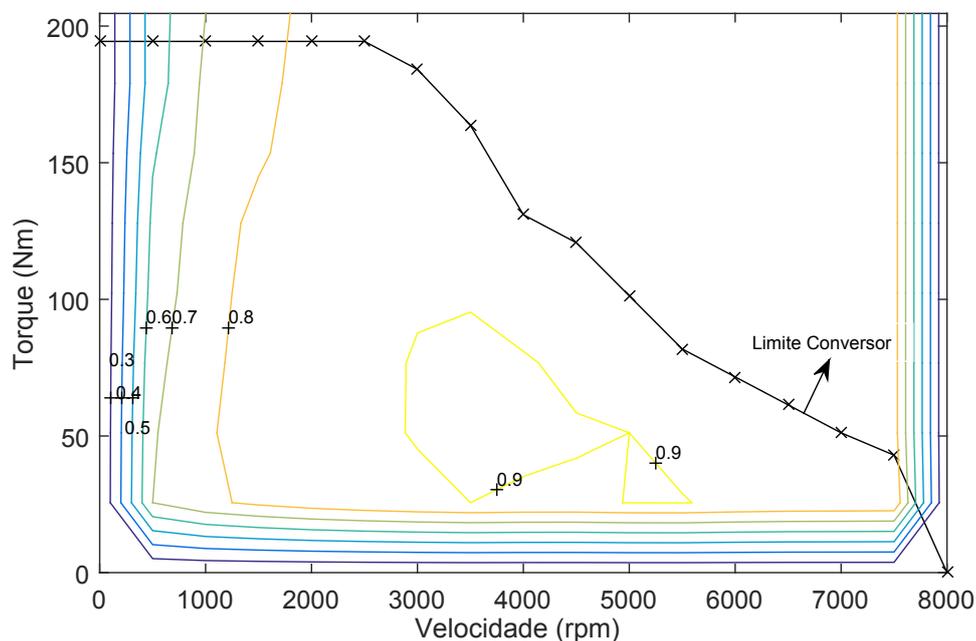
3.2.5 Parâmetros da Configuração Motor Central com Transmissão e Diferencial

Na configuração com motor central os MEs mais utilizados são os de Indução e os síncronos de ímãs permanentes, por isso foram realizadas duas simulações, com a finalidade de analisar o comportamento e eficiência dos mesmos.

3.2.5.1 Mapa de Eficiência do ME

Para a simulação com motor central, o ME de indução com potência de 60 kW, tem eficiência total de 0,91, torque limitado pelo conversor em 200 Nm, massa de 72 kg e mapa de eficiência de acordo com a Figura 17.

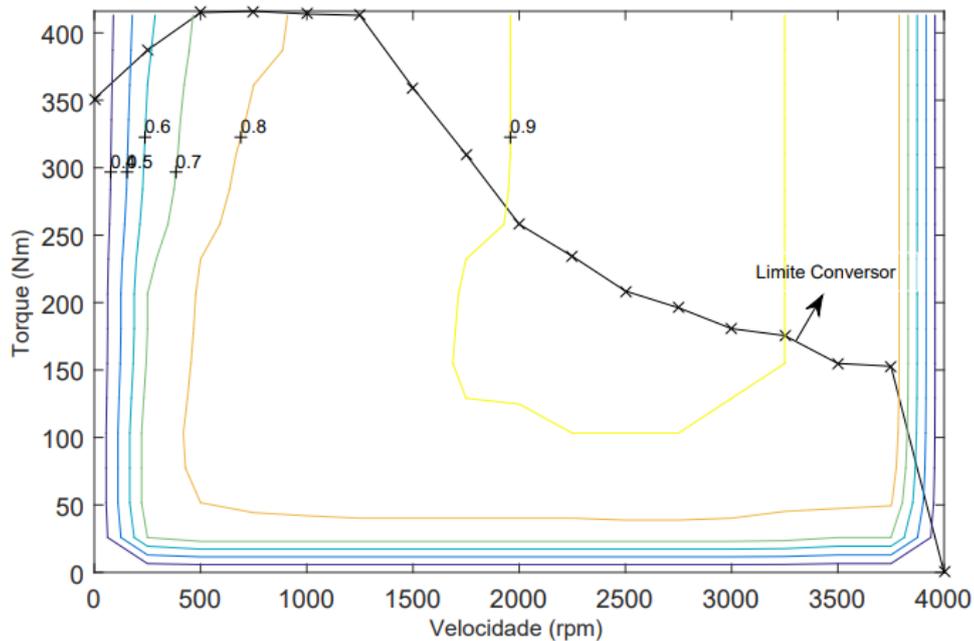
Figura 17 – Mapa de Eficiência ME de Indução 60 kW.



O ME síncrono de ímãs permanentes utilizado tem mapa de eficiência de acordo com a Figura 18, pico de eficiência de 0,92, torque máximo de 400 Nm e massa de 72 kg.

Analisando as figuras, o ME de ímãs permanentes possui um torque mais elevado e em relação ao motor de indução, isso se deve ao fato de possuir uma faixa de rotação menor. A característica de possuir torque maior em baixas rotações, é um

Figura 18 – Mapa de Eficiência ME Síncrono de Ímãs Permanentes 60 kW.



dos principais motivos para a aplicação em VE, que juntamente com uma transmissão, faz com que tenha ótimas respostas em retomadas bruscas de aceleração.

3.2.5.2 Características da Transmissão e Diferencial

Para a configuração com ME central, o emprego de uma transmissão escalonada é apresentada na Tabela 3, mostrando a relação de transmissão de uma caixa de marchas de 5 velocidades.

O diferencial teve sua relação dimensionada levando em conta um bom aproveitamento da faixa de operação do ME e não limitando a velocidade final do VE, para a configuração com ME de indução, a relação foi de 0,47 e utilizando ME de ímãs permanentes 0,21.

Tabela 3 – Relação de transmissão das Marchas

Marcha	Relação
1 ^a	13.45
2 ^a	7.57
3 ^a	5.01
4 ^a	3.77
5 ^a	2.83

A principal função da transmissão e do diferencial é a relação torque e velocidade, com isso, o VE poderá ter respostas bem distintas e possuindo alta dinâmica

tanto em baixas quanto para altas velocidades.

Em menores velocidades, para a aceleração a transmissão deverá ter relação maior, ou seja, o torque é multiplicado mais vezes. Já para velocidades mais altas, em que há inércias de rotação maiores, a relação diminui, diminuindo o torque. Além disso, o mapa de eficiência já mencionado no capítulo 2, depende diretamente das variáveis de rotação e torque, logo para cada faixa de rotação, a eficiência será diferente.

3.2.5.3 Massa de Carga

A massa total do sistema é a soma da massa da carroceria do veículo, do motor, da transmissão, do diferencial, dos acessórios e da massa de carga, que deverá totalizar a massa fixa de 1000 kg para a simulação. A Tabela 4 mostra a massa dos sistemas e a massa de carga.

Tabela 4 – Massa dos Sistemas do VE Motor Central.

Sistema	Massa (kg)
Motor / Controlador	72
Transmissão/Diferencial	114
Carga	127

3.2.6 Parâmetros da Configuração *In wheel* nas Rodas Dianteiras

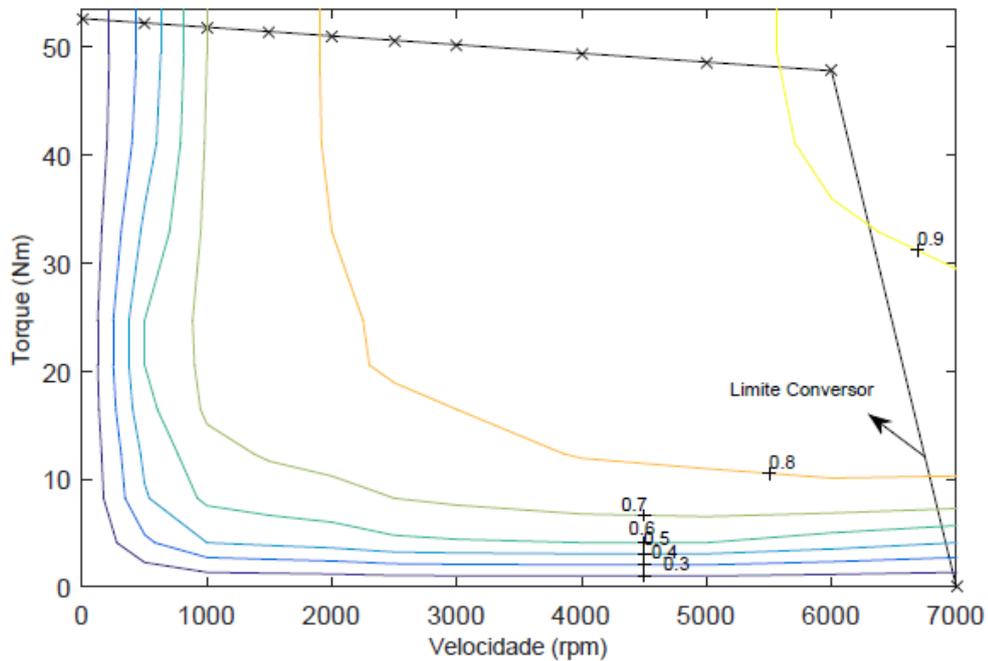
Em sistemas tracionários em que os motores são acoplados diretamente na roda, a transmissão é eliminada, devido a limitação de espaço, podendo ser utilizado em alguns casos um sistema planetário quando houver espaço interno.

Os motores elétricos mais aplicados são os de Ímãs Permanentes, devido sua densidade de potência e eficiência de operação, gerando altas potências com volume e massa pequena.

3.2.6.1 Mapa de Eficiência do ME

Para a simulação com motor acoplado nas rodas dianteiras, os dois motores elétricos de ímãs permanentes com potência de 30 Kw, pico de eficiência de 0.9, torque limitado pelo conversor em 52 Nm, massa de 35 Kg e mapa de eficiência de acordo com a Figura 19.

Figura 19 – Mapa de Eficiência ME Síncrono de Ímãs Permanentes 30 kW.



3.2.6.2 Características da Engrenagem de Redução

O comportamento da Engrenagem de Redução para o caso de acoplamento diretamente nas rodas visa aumentar o torque em baixas rotações, fazendo com que o ME opere em regiões de melhor eficiência. Caso a relação aumente o torque também irá aumentar e como consequência, a velocidade diminui. Analisando-se as velocidades atingidas pelo VE, para uma melhor eficiência do ME, essa polia teve relação de transmissão de 5,7.

3.2.6.3 Massa de Carga

De maneira similar à configuração com motor central a Tabela 5 representa, a soma das massas dos dispositivos de tração, carroceria do veículo e acessórios, que deve ser complementada pela massa de carga, obtendo-se assim a massa total do sistema, que é um parâmetro fixo para a análise correta das simulações.

Tabela 5 – Massa dos Sistemas do VE FWD.

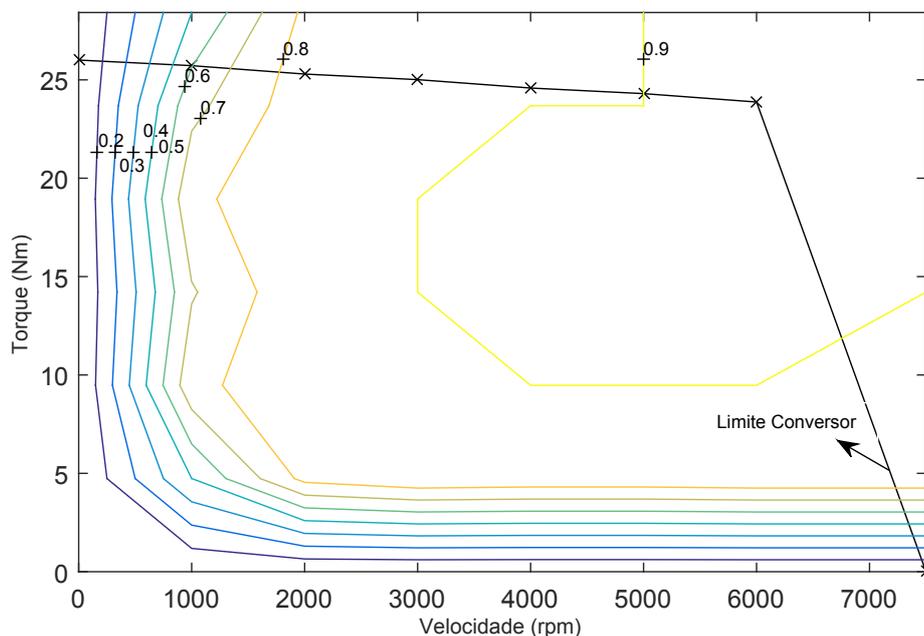
Sistema	Massa (kg)
Motor / Controlador	70
Engrenagem de Redução	50
Carga	194

3.2.7 Parâmetros da Configuração *In wheel* em Todas as Rodas

3.2.7.1 Mapa de Eficiência do ME

Para a simulação *All Wheel Drive* (AWD), ou seja, com motor acoplado em todas as rodas, os quatro motores elétricos de ímãs permanentes têm potência de 15 kW, pico de eficiência de 0,92, e torque limitado pelo conversor em 26 Nm, massa de 22 kg e mapa de eficiência de acordo com a Figura 20.

Figura 20 – Mapa de Eficiência ME Síncrono de Ímãs Permanentes 15 kW.



3.2.7.2 Características da Engrenagem de Redução

Analisando-se o perfil de velocidades atingidas pelo carro, para uma melhor eficiência dos pontos de operação do ME, foi incluída uma Engrenagem de Redução, que teve relação de transmissão de 7,8, que solicita um torque razoável ao motor e não limitando a velocidade. Como é possível perceber, a polia tem relação maior do que

à configuração com motores acoplados apenas nas rodas dianteiras, com a finalidade de aumentar o torque de cada motor em velocidades mais baixas.

3.2.7.3 Massa de Carga

De maneira similar à configuração motor acoplado diretamente nas rodas dianteiras, a massa de carga é obtida na Tabela 6, onde são mostradas as massas do Motor e Controlador, Engrenagem de Redução e da massa de carga que deve ser complementada para atingir o parâmetro desejado de massa total.

Tabela 6 – Massa dos Sistemas do VE AWD.

Sistema	Massa (kg)
Motor / Controlador	86
Engrenagem de Redução	50
Carga	177

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos das simulações propostas no Capítulo 3 utilizando-se o ADVISOR. Desta forma, neste capítulo são apresentadas comparações e análise das vantagens e desvantagens das configurações aplicadas ao VE.

4.1 CONFIGURAÇÃO MOTOR CENTRAL COM TRANSMISSÃO E DIFERENCIAL

A partir dos dados do veículo e os parâmetros do ME, bateria, transmissão e diferencial foram realizadas duas análises, uma com ME de indução e a outra com ME de ímãs permanentes, com a finalidade de analisar os comportamentos dos motores, determinando qual deles é o mais eficiente para esse tipo de configuração.

4.1.1 Resultados do Ciclo de Condução

A primeira simulação, com ME de indução, percorreu 4753 pontos, equivalente a uma distância de 33,46 km e a segunda, utilizando ME de ímãs permanentes, completou 4859 pontos, aproximadamente 34,51 km. Como pode-se observar na Figura 21 e Figura 22, os MEs analisados conseguiram cumprir o ciclo imposto e além disso, o ME de ímãs permanentes obteve uma autonomia maior.

Figura 21 – Velocidade e distância percorrida pelo VE utilizando Motor de Indução de 60 kW.

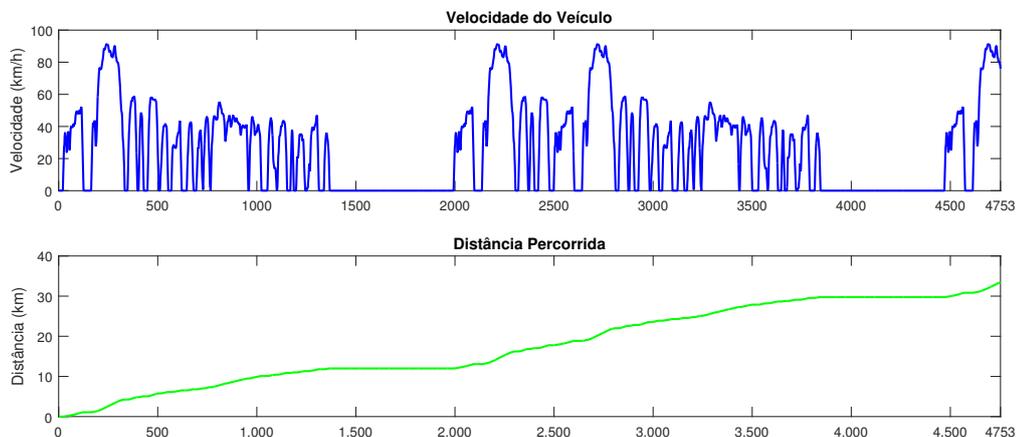
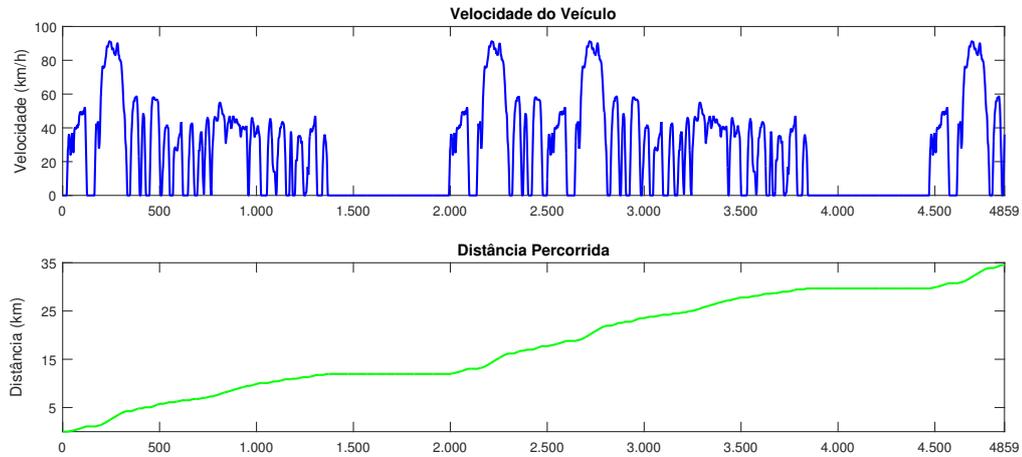


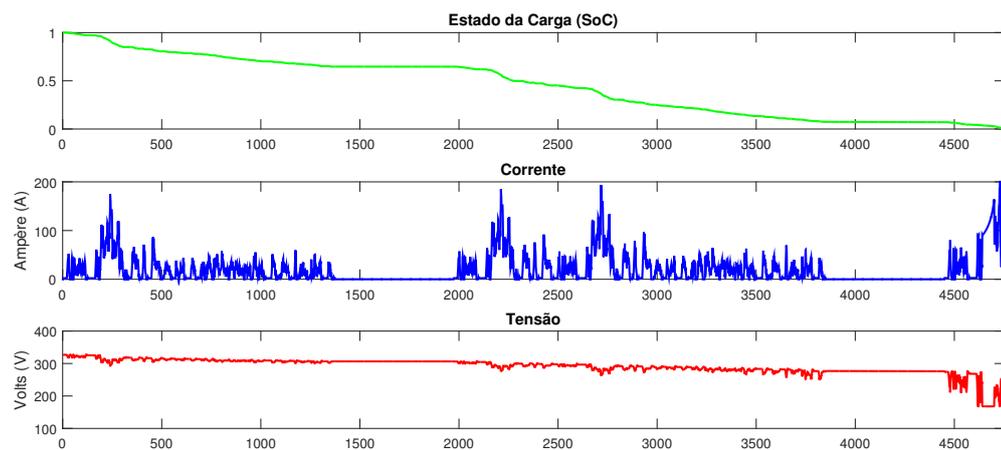
Figura 22 – Velocidade e distância percorrida pelo VE utilizando Motor de Ímãs Permanentes de 60 kW.



4.1.2 Resultados do Sistema de Armazenamento

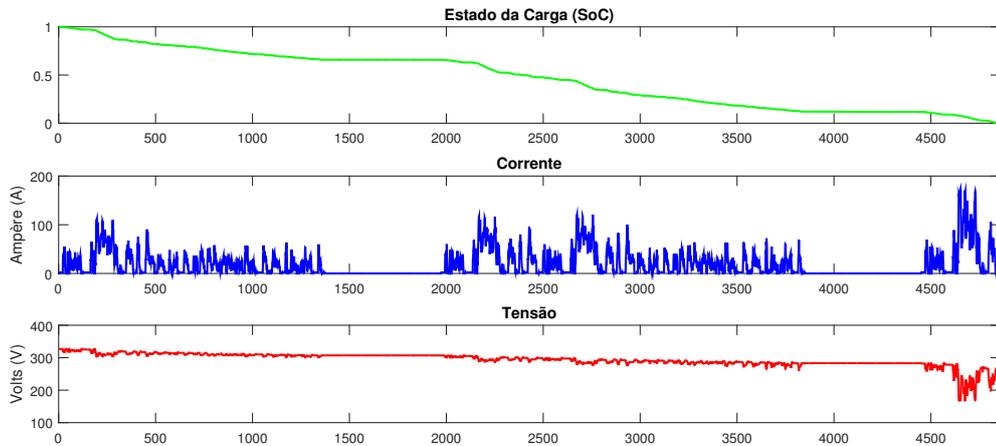
O sistema de armazenamento de energia foi padronizado para todas as simulações, e utiliza-se uma associação paralela e série das baterias de íon lítio, tendo-se obtido a tensão de 300 V e a capacidade de 18 Ah. Com isso o parâmetro a ser analisado é a curva de descarga (SoC), já discutido anteriormente no capítulo 3. A curva do SoC, a corrente demandada e a tensão das baterias são mostradas na Figura 23 e Figura 24.

Figura 23 – Dados obtidos das baterias com Motor de Indução de 60 kW.



Pode-se observar que a potência requerida do ME é suprida pela tensão e corrente do sistema de armazenamento. Logo, quanto maior a potência requerida, a corrente será maior e ocasionará uma maior descarga da bateria, uma vez que a tensão não varia. A tensão somente varia quando a curva de descarga já está bem

Figura 24 – Dados obtidos das baterias com Motor de Ímãs Permanentes de 60 kW.



baixa, quando a resistência está mais alta, como consequência, a corrente é elevada. Os pontos onde ocorrem acelerações da Figura 21 e Figura 22, são os mesmos onde se situam os picos de corrente e os pontos de descargas profundas.

4.1.3 Resultados dos Motores Elétricos

Para uma melhor análise do consumo de energia do banco de baterias, é importante analisar alguns parâmetros do ME, como a potência requerida, o torque requerido e a rotação. Através da Figura 26 e Figura 25, pode-se observar que o ME de ímãs permanentes possui uma faixa de rotação menor do que o ME de indução, conseqüentemente o torque é maior. Essa é uma característica relevante quando aplica-se este tipo de motor em VE, pois com menor velocidade rotacional no eixo do motor, menor será sua força de aceleração inercial requerida.

4.1.4 Pontos de Eficiência do ME

A principal variável para ser analisada na simulação consiste nos pontos de operação do ME, em função do torque e da velocidade angular do motor. Relacionando-se com as figuras mostradas nas seções anteriores, a Figura 27 e a Figura 28 contém os pontos de eficiência para cada ponto do ciclo de condução, essa resposta é ocasionada pela potência requerida pelo ciclo, esta por sua vez, é obtida pelo produto torque e velocidade angular.

Figura 25 – Resultados de Potência, Torque e Rotação requerida do Motor de Indução de 60 kW.

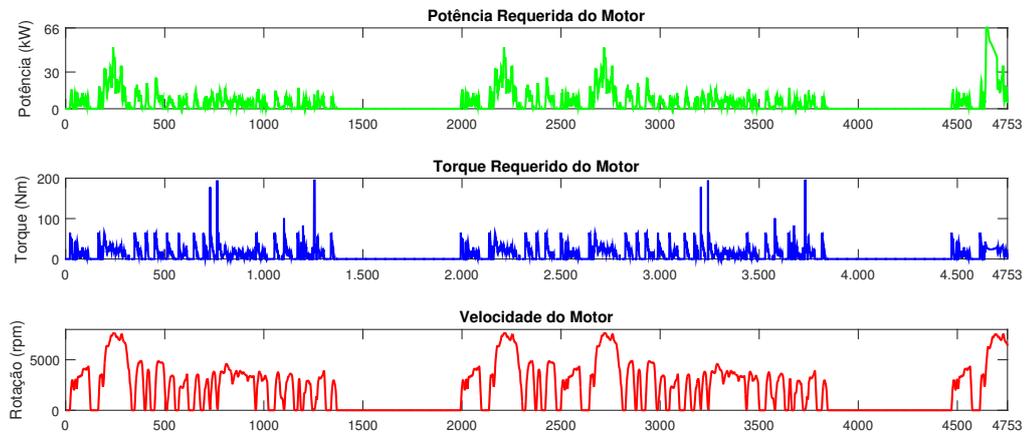


Figura 26 – Resultados de Potência, Torque e Rotação requerida do Motor de Ímãs Permanentes 60 kW.

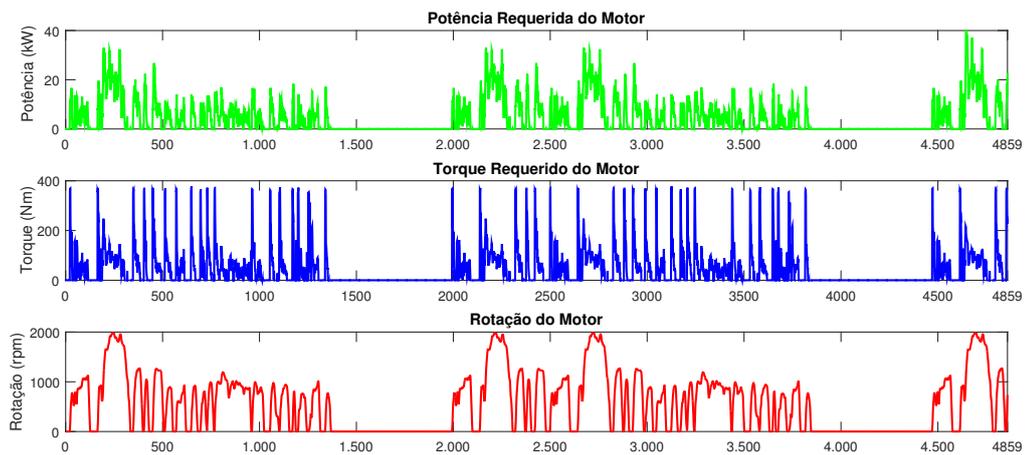


Figura 27 – Pontos de operação do Motor de Indução de 60 kW.

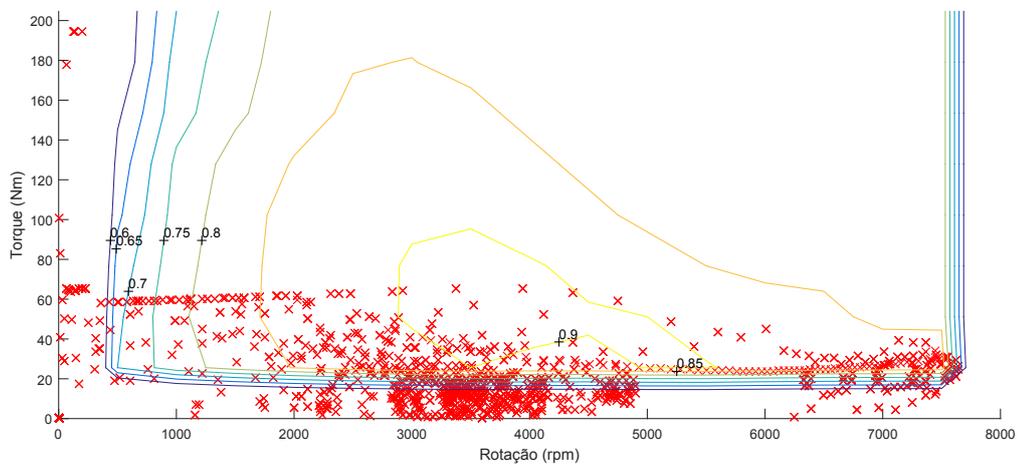
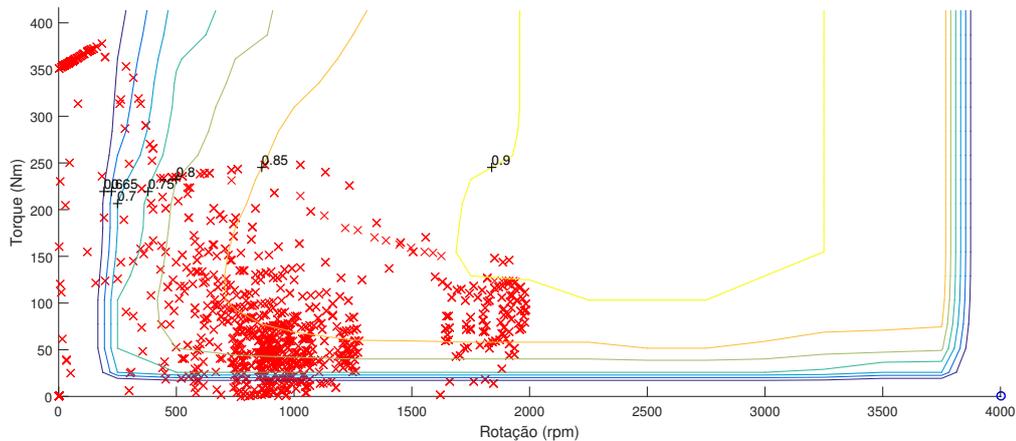


Figura 28 – Pontos de operação do Motor de Ímãs Permanentes de 60 kW.



Comparando as simulações realizadas a menor autonomia da configuração com motor central, foi utilizando ME de indução. Isso se deve ao fato desse tipo de motor possuir regiões de eficiência menores em comparação ao ME síncrono de Ímãs Permanentes.

Em contrapartida, apesar do resultado de maior autonomia, a utilização do ME de ímãs permanentes deve ser levado em conta o custo de fabricação em relação ao ME de indução, pois o fato de não possuir ímãs faz com que o preço do motor seja menor.

O que pode tornar viável o emprego de motores de indução é o desenvolvimento de malhas de controle, manipulando as variáveis torque e velocidade com finalidade de obter pontos de operação com melhor eficiência, aumentado assim a autonomia.

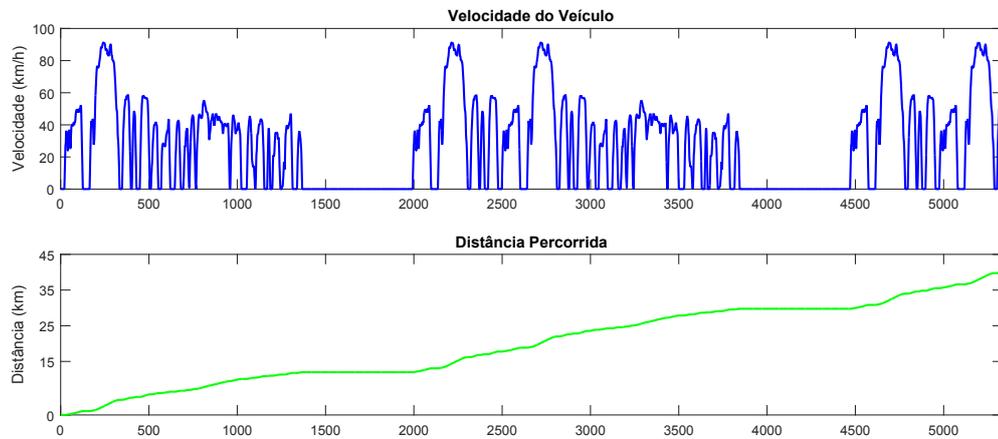
4.2 CONFIGURAÇÃO *IN WHEEL* NAS RODAS DIANTEIRAS

Para esta configuração a potência de cada ME de ímãs permanentes foi de 30 kW, totalizando os 60 kW.

4.2.1 Resultados do Ciclo de Condução

A simulação teve como resultado 5333 pontos percorridos, equivalente a uma distância de 40,14 km de acordo com a Figura 29, pode-se observar que o veículo conseguiu cumprir as acelerações e velocidades do percurso imposto pelo ciclo FTP.

Figura 29 – Velocidade e distância percorrida pelo VE utilizando Motores de Ímãs Permanentes de 30 kW.

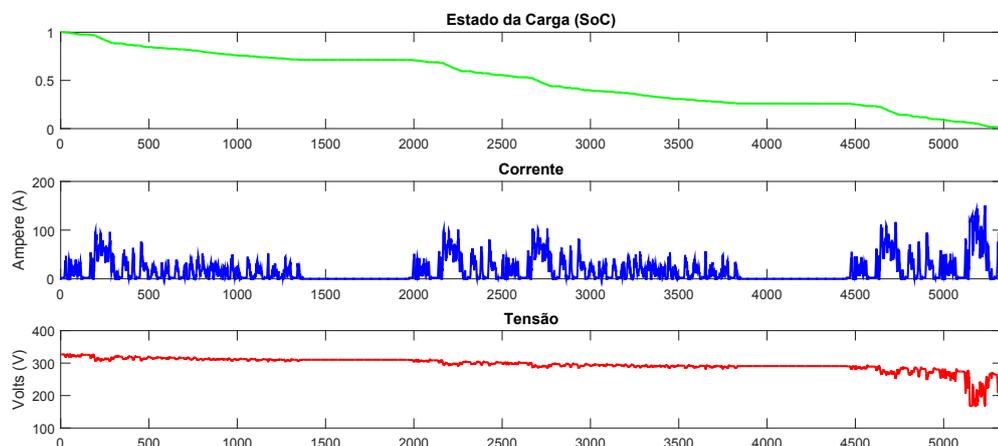


Outra questão a ser analisada é que a autonomia foi consideravelmente maior do que configuração anterior utilizando ME de ímãs permanentes também, mostrando que eliminando a transmissão e diferencial, e acoplado o ME diretamente na roda, o ME tem uma eficiência maior.

4.2.2 Resultados do Sistema de Armazenamento

A curva do SoC, a corrente demandada e a tensão da bateria são mostradas na Figura 30. Ressaltando que os dados obtidos foram para o consumo energético dos dois motores elétricos. O comportamento oscilatório da tensão no final da descarga, foi semelhante à configuração anterior, ocasionando picos de corrente.

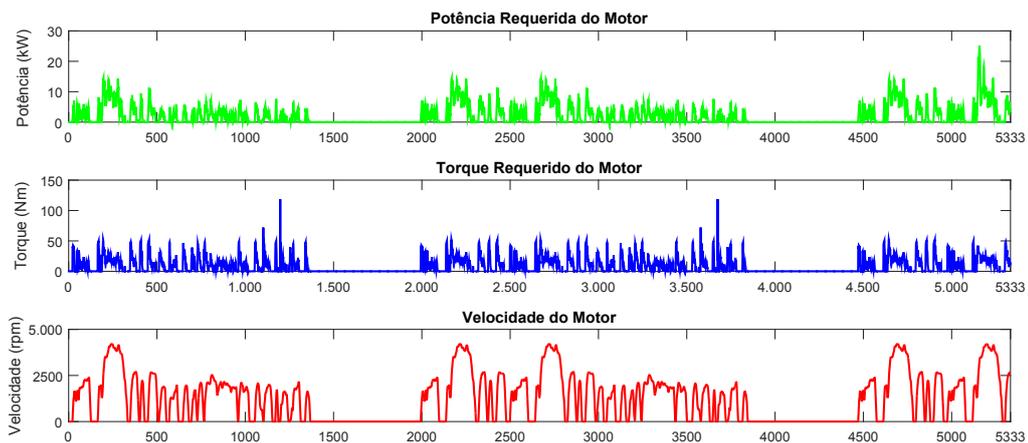
Figura 30 – Dados da bateria com Motores de Ímãs Permanentes 30 kW.



4.2.3 Resultados dos Motores Elétricos

Os resultados do comportamento de cada ME são mostrados na Figura 31. Devido a configuração ser de motores acoplados diretamente nas rodas, o ME aplicado foi somente o de ímãs permanentes, pois ocupam espaço reduzido e geram potências consideráveis. A maior potência e torque exigido de cada motor foi 25,2 kW e 118 Nm, respectivamente. Como a configuração não possui transmissão, a grande vantagem para a aplicação *In Wheel* do ME de ímãs permanentes é o torque elevado em uma grande faixa de rotação, fazendo com que opere em regiões de maior eficiência.

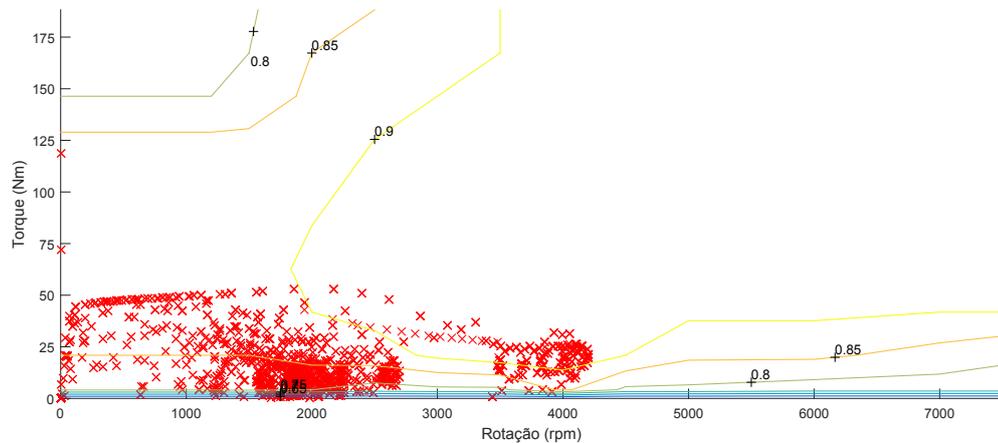
Figura 31 – Resultados de Potência, Torque e Rotação requerida do Motor de Ímãs Permanentes 30 kW.



4.2.4 Pontos de Eficiência dos Motores Elétricos

Através da relação entre torque e rotação, obtém-se os pontos de operação do ME, de maneira semelhante à configuração anterior, a Figura 32 representa as regiões de eficiência onde o ME operou. Como pode-se observar, se o motor fosse acoplado sem redução, mesmo a faixa de rotação em região de alta eficiência seja grande, em baixas velocidades a eficiência ainda é baixa, com a polia redutora, é aumentada a rotação, deslocando-a para uma região em que a autonomia será maior.

Figura 32 – Pontos de operação do Motor de Ímãs Permanentes de 30 kW.



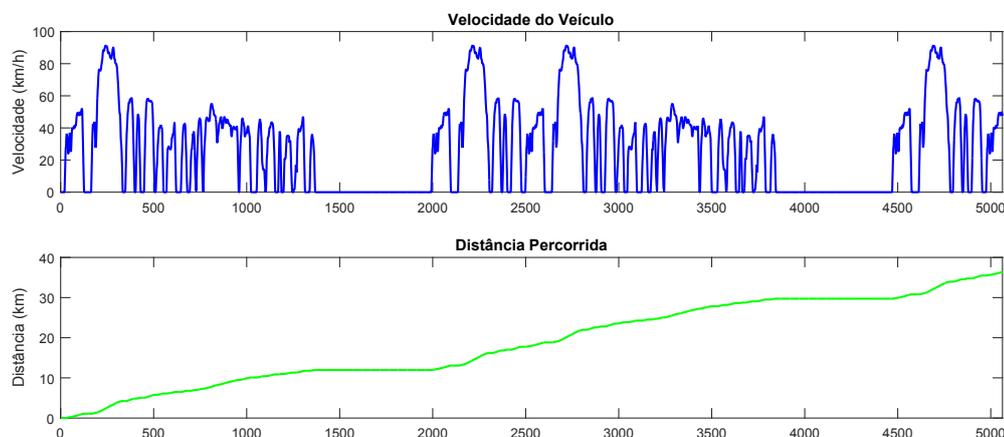
4.3 CONFIGURAÇÃO *IN WHEEL* EM TODAS AS RODAS

Para esta configuração a potência de cada ME de ímãs permanentes foi de 15 kW, totalizando os 60 kW de potência que foi estabelecida.

4.3.1 Resultados do Ciclo de Condução

A simulação com ME de ímãs permanentes de 15 kW, percorreu 5063 pontos, aproximadamente 36,4 km, como pode-se observar na Figura 33. De maneira semelhante às configurações anteriores, o VE conseguiu cumprir o ciclo sem limitação de velocidade.

Figura 33 – Velocidade e distância percorrida pelo VE utilizando Motores de Ímãs Permanentes de 15 kW.



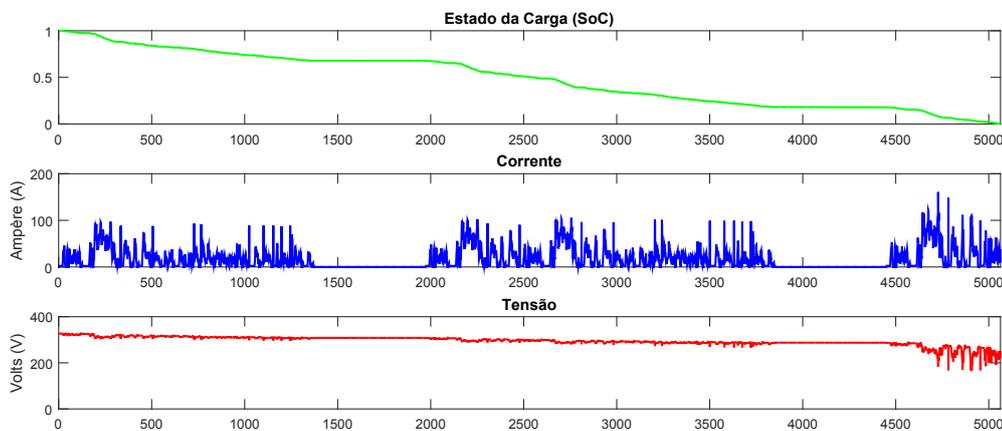
Em comparação à configuração com MEs apenas em rodas dianteiras, acoplado ME em todas as rodas, o gasto energético é maior, isso se deve ao fato da

redução do torque, que é dividido nas quatro rodas, com isso os pontos de operação também se alteram.

4.3.2 Resultados do Sistema de Armazenamento

O sistema de armazenamento tem os resultados apresentados na Figura 34, onde é mostrada as curvas do SoC, corrente e tensão. Pode-se observar as oscilações no final da descarga decorrente do aumento da resistência interna da bateria, assim como se ocorreu nas demais simulações.

Figura 34 – Dados da bateria com Motores de Ímãs Permanentes 15 kW.



4.3.3 Resultados dos Motores Elétricos

Os resultados obtidos da potência, torque e rotação de cada motor, são mostrados na Figura 35, onde é possível observar que possuem baixos níveis de torque e potência, uma vez que são quatro MEs em conjunto.

4.3.4 Pontos de Eficiência dos Motores Elétricos

A principal diferença entre a configuração com motores acoplados nas rodas dianteiras para esta configuração, é que a rotação é mantida constante, porém o torque é distribuído entre as quatro rodas, logo os pontos de operação também se difere. De acordo com a Figura 36 é possível observar que os pontos possuem uma grande região de alta eficiência, porém em baixas rotações, o que faz com que a eficiência tenha um baixo valor.

Figura 35 – Resultados de Potência, Torque e Rotação requerida do Motor de Ímãs Permanentes 15 kW.

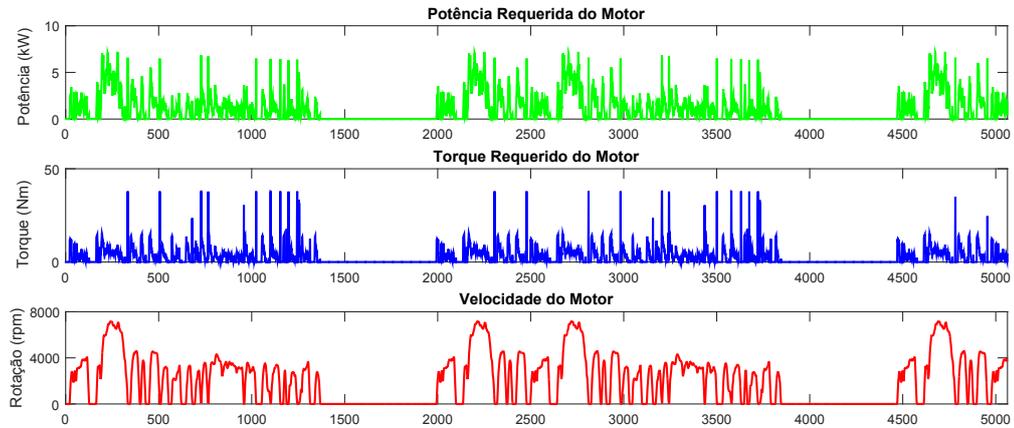
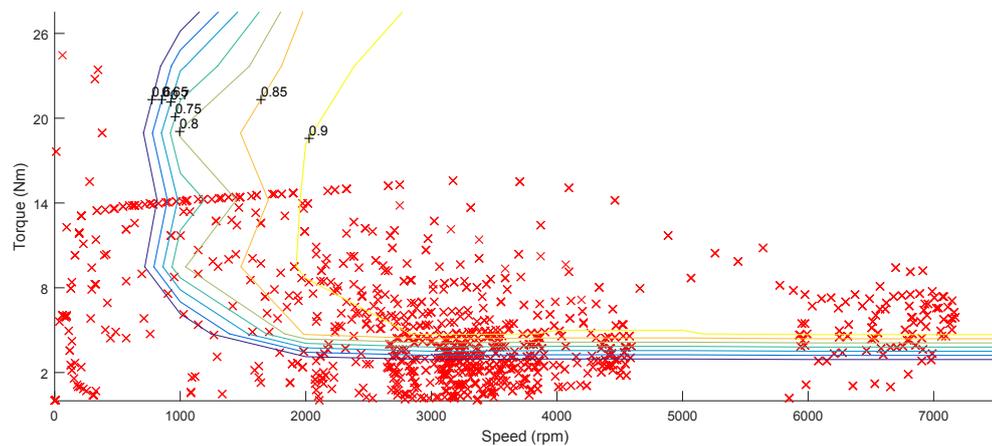


Figura 36 – Pontos de operação do Motor de Ímãs Permanentes de 15 kW.



Através das simulações *In Wheel*, observa-se que a autonomia foi maior do que a configuração com motor central, logo viabiliza a utilização dos ME de ímãs permanentes, mesmo que o custo de fabricação seja alto.

Além disso, a aplicação de ME de indução deve ser levado em conta o espaço físico, pois trata-se de um motor com volume e massa considerável, limitando seu acoplamento diretamente na roda e necessitando de uma transmissão.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Considerando as análises realizadas e os resultados obtidos neste trabalho tem-se que o tipo de ME e a configuração do VE são fatores de grande importância, pois a operação do ME altera seus pontos de eficiência o que determina consequentemente seu gasto energético. Mesmo com o dimensionamento da capacidade de bateria sendo relativamente baixo, a diferença de autonomia foi perceptível. Em VE comerciais o conjunto de armazenamento energético é maior do que o apresentado neste trabalho, visando uma autonomia maior, com isso a pequena diferença de autonomia torna-se grande e relevante.

Conclui-se também que os sistemas de tração *In wheel* para veículos elétricos puros apresentada neste trabalho, teve uma maior autonomia em relação à configuração com motor central e transmissão. Isso se deve ao fato de que os MEs de ímãs permanentes possuem uma faixa de boa eficiência extensa. Outra conclusão relevante é que a configuração somente com MEs nas rodas dianteiras apresentou melhor autonomia do que a configuração com MEs nas quatro rodas, devido ao torque solicitado é maior quando possui apenas dois motores, fazendo com que o motor opere em região de ótima eficiência.

A possibilidade do desenvolvimento de um controlador também é válida, uma vez que pode-se melhorar ainda mais os pontos de eficiência do ME. Além disso, a configuração *In Wheel*, é válida e pode ser utilizada para outros tipos de veículos, como os veículos híbridos, operando em conjunto com MCI.

Posteriormente os resultados considerou-se a possibilidade da implementação de sistema de controle o controle de torque e rotação, necessitando de um estudo mais aprofundado. Para isso é proposto como trabalhos futuros realizar o dimensionamento do sistema de controle, em busca de uma autonomia maior.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Eduardo Gurgel do et al. Veículo elétrico com sistema energético híbrido: Célula de combustível/baterias eletroquímicas. [sn], 1998. Citado na página 20.

BARAN, Renato. **A introdução de veículos elétricos no Brasil: Avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade**. 2012. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado)-Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

BARASSA, Edgar et al. Trajetória tecnológica do veículo elétrico: atores, políticas e esforços tecnológicos no Brasil. [sn], 2015. Citado na página 22.

BENTO, João Paulo Moreira. Análise da viabilidade de adaptação de motores elétricos nos cubos de rodas traseiros de veículos de passeio. 2015. Citado na página 34.

BINACIONAL, Itaipu. **Veículos Elétricos**. 2015. Itaipu Binacional. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/tecnologia/veiculos-eletricos>>. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

BORBA, BSMC. Modelagem integrada da introdução de veículos leves conectáveis à rede elétrica no sistema energético brasileiro. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

CASOTTI, Bruna Pretti; GOLDENSTEIN, Marcelo. Panorama do setor automotivo: as mudanças estruturais da indústria e as perspectivas para o Brasil. **BNDES Setorial, Rio de Janeiro**, n. 28, p. 147–187, 2008. Citado na página 23.

CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro de; FERREIRA, Tiago Toledo. Veículos elétricos: aspectos básicos, perspectivas e oportunidades. **BNDES Setorial, n. 32, set. 2010, p. 267-310**, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2010. Citado na página 18.

CORRÊA, Fernanda Cristina et al. Desenvolvimento e análise de estratégias de gerenciamento de potência em veículo elétrico híbrido de configuração paralela. [sn],

2013. Citado 9 vezes nas páginas 22, 27, 28, 29, 30, 32, 35, 36 e 40.

EHSANI, Mehrdad; RAHMAN, Khwaja M; TOLIYAT, Hamid A. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. **IEEE Transactions on industrial electronics**, IEEE, v. 44, n. 1, p. 19–27, 1997. Citado na página 16.

ELÉTRICOS, Associação Brasileira de Veículos. **Caminhão elétrico da Volks-MAN é vitória da tecnologia nacional**. 2018. Associação Brasileira de Veículos Elétricos. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/caminhao-eletrico-da-volks-man-e-vitoria-da-tecnologia-nacional/>>. Citado na página 24.

FERREIRA, Tarcísio José Pedrobon et al. Sistema de gerenciamento de energia para controle de carga/descarga entre baterias de lítio e ultracapacitores, envolvendo sistema de tração elétrica com frenagem regenerativa. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2014. Citado na página 21.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale, PA: **Society of Automotive Engineers**. [S.l.]: Inc, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 39.

LARMINIE, James; LOWRY, John. **Electric vehicle technology explained**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 16, 25 e 29.

LOPES, Juliana. **Estratégias de gerenciamento de potência em ônibus de transporte urbano elétrico híbrido série**. 2008. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 21, 22, 30, 31 e 35.

MARKEL, Tony et al. Advisor: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. **Journal of power sources**, Elsevier, v. 110, n. 2, p. 255–266, 2002. Citado na página 42.

MEHRDAD, Ehsani; YIMIN, Gao; ALI, Emadi. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**. [S.l.]: CRC press Boca Raton, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 42.

REVOREDO, Téo Cerqueira. Modelagem e gerenciamento de potência de um veículo elétrico híbrido de célula a combustível. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**,

Rio de Janeiro, **Tese de Mestrado**, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 28 e 29.

RODRIGUES, Julio Cesar Bortolini. **Dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos-tração dianteira in-wheel**. 2017. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. Citado na página 32.

TANAKA, Carlos Naomi. **Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos**. 2013. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2013. Citado na página 25.

WESTBROOK, Michael Hereward. **The Electric Car: Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars**. [S.l.]: let, 2001. Citado na página 22.

XUE, XD; CHENG, KWE; CHEUNG, NC. Selection of electric motor drives for electric vehicles. In: IEEE. **Power Engineering Conference, 2008. AUPEC'08. Australasian Universities**. [S.l.], 2008. p. 1–6. Citado na página 34.

ZERAOULIA, Mounir; BENBOUZID, Mohamed El Hachemi; DIALLO, Demba. Electric motor drive selection issues for hev propulsion systems: A comparative study. **IEEE Transactions on Vehicular technology**, IEEE, v. 55, n. 6, p. 1756–1764, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.