UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

LEONARDO BOLDRINI DE JESUS

PROJETO BÁSICO E SIMULAÇÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO DE CARGA LEVE E AUTONOMIA LIMITADA PARA USO EM CICLOS CURTOS

VITÓRIA – ES
AGOSTO/2014

LEONARDO BOLDRINI DE JESUS

PROJETO BÁSICO E SIMULAÇÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO DE CARGA LEVE E AUTONOMIA LIMITADA PARA USO EM CICLOS CURTOS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Leonardo Boldrini de Jesus**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Costa Drumond Sousa

VITÓRIA – ES
AGOSTO/2014

LEONARDO BOLDRINI DE JESUS

PROJETO BÁSICO E SIMULAÇÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO DE CARGA LEVE E AUTONOMIA LIMITADA PARA USO EM CICLOS CURTOS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Leonardo Boldrini de Jesus**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 1º, de Agosto de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA:

_____

Prof. Dr. Gilberto Costa Drumond Souza
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

_____

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

_____

Prof. Dr. Alessandro Mattedi
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado força para seguir em frente, enfrentar as dificuldades e poder alcançar mais esta vitória.

Ao meu professor orientador, muito obrigado por toda a disponibilidade e pelos conhecimentos compartilhados, sem os quais este trabalho não teria sido possível.

Aos amigos, familiares e colegas de curso, meu agradecimento por sempre terem estado ao meu lado, tanto nos momentos felizes quanto tristes.

RESUMO

Os veículos elétricos já dominaram o mercado de automóveis por volta de 1900. Após a década de 30 seu uso foi praticamente extinto, porém, atualmente, dado os alarmantes índices de poluição atmosférica e dos altos preços da gasolina, o interesse com relação ao seu uso volta a crescer. Além de representar uma alternativa para o transporte de passageiros, os veículos elétricos também podem ser utilizados no transporte de cargas. O projeto de um veículo elétrico envolve etapas de dimensionamento de componentes e de simulações para análise da operação do veículo frente a uma determinada condição de trabalho. Este projeto de graduação tem como objetivo propor a utilização de um veículo de carga leve, totalmente elétrico, que toma como referência o veículo convencional utilizado na coleta de lixo na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Para tal será realizado dimensionamento básico de componentes e análises a partir dos Softwares MATLAB e Simulink.

Palavras-Chave: Veículo Elétrico. Dimensionamento. Simulação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema básico de um veículo híbrido série 12
Figura 2 – Esquema básico de um veículo híbrido paralelo 12
Figura 3 – Arquitetura básica de um veículo totalmente elétrico CC/CA 13
Figura 4 – Tipos de motores de corrente contínua 23
Figura 5 – Perfil de torque versus velocidade de um motor de indução controlado com fluxo constante 25
Figura 6 – Perfil de torque versus velocidade de um motor de indução controlado com tensão constante 25
Figura 7 – Perfil de torque versus velocidade de um motor de indução tipicamente utilizado em tração elétrica 26
Figura 8 – Princípio de funcionamento de um motor de relutância chaveada 27
Figura 9 – Princípio de funcionamento de um motor CC sem escovas 28
Figura 10 – Veículo atualmente utilizado na coleta de lixo na UFES 30
Figura 11 – Simulação do ciclo de trabalho do veículo 32
Figura 12 – Circuito equivalente simplificado da bateria 36
Figura 13 – Metodologia para o dimensionamento e simulação do veículo elétrico 39
Figura 14 – Potência no eixo do motor em um ciclo 41
Figura 15 – Torque no eixo do motor em um ciclo 41
Figura 16 – Descarga da bateria em função da distância percorrida 42
Figura 17 – Descarga da bateria em um ciclo 43
Figura 18 – Simulação do sistema de controle 48
Figura 19 – Corrente, tensão e potência de bateria para o período de aceleração do veículo 49
Figura 20 – Rotação e torque do motor para o período de aceleração do veículo 50
Figura 21 – Corrente, tensão e potência de bateria para o período em regime do veículo 51
Figura 22 – Rotação e torque do motor para o período em regime do veículo 51
Figura 23 – Corrente, tensão e potência de bateria para o período de desaceleração do veículo 52
Figura 24 – Rotação e torque do motor para o período de desaceleração do veículo 53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 7
2. TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS 11
3. BATERIAS PARA TRAÇÃO ELÉTRICA 15
3.1. BATERIA CHUMBO-ÁCIDA 17
3.2. BATERIA NÍQUEL-CÁDMIO 18
3.3. BATERIA NÍQUEL-HIDRETO METÁLICO 19
3.4. BATERIA ÍON-LÍTIO 20
3.5. COMPARATIVO ENTRE BATERIAS 20
4. MOTORES ELÉTRICOS 22
4.1. MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA 22
4.2. MOTOR DE INDUÇÃO 24
4.3. MOTOR DE RELUTÂNCIA CHAVEADA 26
4.4. MOTOR CC SEM ESCOVAS 27
4.5. COMPARATIVO ENTRE MOTORES 28
5. MODELAGEM DO VEÍCULO ELÉTRICO 30
5.1. MODELAGEM DO CICLO DE TRABALHO 31
5.2. MODELAGEM DO ESFORÇO DE TRAÇÃO 32
5.2.1. FORÇA DE RESISTÊNCIA AO ROLAMENTO 32
5.2.2. FORÇA DE ARRASTO AERODINÂMICO 33
5.2.3. FORÇA DE RESISTÊNCIA AO ACLIVE 34
5.2.4. FORÇA DE ACELERAÇÃO 34
5.2.5. FORÇA DE TRAÇÃO 35
5.3. MODELAGEM DA POTÊNCIA DO MOTOR 35
5.4. MODELAGEM DAS BATERIAS 36
5.5. PROJETO E SIMULAÇÃO 39
6. SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE 47
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 55
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 56
APÊNDICE A – SCRIPT DO MATLAB PARA SIMULAÇÃO DO CICLO DE TRABALHO DE VEÍCULO 59

APÊNDICE B – SCRIPT DO MATLAB PARA CÁLCULO DA TENSÃO DE CIRCUITO ABERTO DA BATERIA **60**
APÊNDICE C – SCRIPT DO MATLAB PARA PROJETO E SIMULAÇÃO DO VEÍCULO ELÉTRICO **61**
APÊNDICE D – SCRIPT DO MATLAB PARA ANÁLISE DO ACLIVE MÁXIMO DO VEÍCULO **63**
ANEXO A – SCRIPT DO MATLAB PARA CALCULAR A ENERGIA CONSUMIDA PELO MOTOR **64**

1. INTRODUÇÃO

Atualmente muito se tem falado sobre o uso de veículos elétricos no transporte de pessoas e cargas como forma de reduzir a poluição ambiental e sonora nas grandes cidades, além de reduzir a dependência do petróleo no setor de transportes (LARMINIE; LOWRY, 2003).

Apesar de parecer novo, o uso de veículos elétricos no transporte de pessoas e cargas não é novidade, tendo em vista que, em 1834, já existiam protótipos de veículos tracionados por motores elétricos (OECD; IEA, 2013).

A história dos veículos elétricos pode ser dividida em 5 períodos (OECD; IEA, 2013):

- **O início (1801-1850):** Os primeiros veículos elétricos são inventados na Escócia e nos Estados Unidos;
- **A primeira era (1851-1900):** Veículos elétricos entram no mercado e começam a ganhar aceitação dos consumidores;
- **Ápice e queda (1901-1950):** Os veículos elétricos atingem picos históricos de produção, sendo, em seguida, praticamente extintos devido à inserção dos veículos movidos à gasolina no mercado;
- **Segundo era (1951-2000):** Os altos preços do petróleo e os elevados níveis de poluição atmosférica renovam o interesse por veículos elétricos;
- **Terceira era (a partir de 2001):** Setores públicos e privados começam a estimular a eletrificação de veículos.

Os principais eventos envolvendo veículos elétricos durante esses períodos podem ser visualizados no Quadro 1.

Quadro 1– Cronologia de eventos relacionados a veículos elétricos

1834	Thomas Davenport, dos Estados Unidos da América (EUA), constrói um veículo elétrico, tracionado por um motor de corrente contínua, que operava em uma via circular eletrificada.
1897	O primeiro veículo elétrico comercial entrou na frota de taxi de Nova York. O fabricante de carros Pope Manufacturing Co se tornou a primeira indústria fabricante de veículos elétricos em larga escala dos EUA.
1899	O veículo La Jamais Contente, construído na França, se tornou o primeiro veículo elétrico a viajar a mais de 100 km/h.
1900	Os veículos elétricos alcançaram o topo de vendas dos EUA com 28% do mercado.
1912	O estoque global de veículos elétricos atinge a marca de 30 mil unidades.
1935	A utilização de veículos elétricos é praticamente extinta devido à utilização de veículos a combustão interna e a disponibilidade de gasolina barata.
1973	O embargo de petróleo, imposto pela Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), causa alta do preço da gasolina além de longas filas nos postos de abastecimento. Este fato renova o interesse pela utilização de veículos elétricos.
1996	Para cumprir com os requerimentos do mandato Veículos de Emissão Zero (ZEV, na sigla em inglês), emitido pela Califórnia em 1990, a General Motor produz e começa a alugar o carro elétrico EV1.
1997	No Japão, a Toyota começa a vender o Prius, o primeiro carro híbrido comercial. 18 mil unidades são vendidas no primeiro ano de produção.
2008	Preço do barril de petróleo ultrapassa US$145,00.
2010	Criação da Electric Vehicles Initiative (EVI), que consiste em uma política multi-governamental (composta por países como EUA, Alemanha, Japão, Itália, etc.) com a intenção de acelerar a introdução e adoção dos veículos elétricos ao redor do mundo.
2011	A venda anual de veículos elétricos atinge a marca de 45 mil unidades.
2012	A venda anual de veículos elétricos atinge a marca de 113 mil unidades.

Fonte: OECD e IEA (2013).

Como apresentado anteriormente, o interesse por veículos elétricos tem crescido muito nos últimos anos, principalmente depois da criação da EVI em 2010. De 2011 para 2012, as vendas anuais de veículos elétricos ao redor do mundo mais que dobraram. O estoque global de veículos elétricos ultrapassou a marca de 180 mil unidades, embora este valor represente apenas 0,02% da frota global de veículos utilizados no transporte de passageiros. A EVI possui ambições ousadas, estimando que, até 2020, a frota global de veículos elétricos represente 2% da frota global de veículos utilizados no transporte de passageiros, um total de 20 milhões de veículos elétricos ao redor do mundo (OECD; IEA, 2013).

Os veículos elétricos quando comparados com os veículos convencionais apresentam diversas vantagens, dentre as quais:

- **Eficiência enérgica:** Os veículos elétricos apresentam um sistema de transmissão mais eficiente e não consomem energia quando não estão em movimento (BARRETO, 1986; NOCE, 2009).
- **Manutenção simples**: Dado o sistema de transmissão mais simples e o menor número de partes móveis, os veículos elétricos são de fácil manutenção quando comparado aos veículos convencionais, além desta ser mais barata, dado, por exemplo, a não necessidade de troca de filtros e óleo (BARRETO, 1986; NOCE, 2009).
- **Redução na poluição ambiental e sonora**: Os veículos elétricos são essencialmente veículos silenciosos e que não emitem diretamente gases causadores do efeito estufa (LARMINIE; LOWRY, 2003).
- **Diminuição na dependência de petróleo**: Sabe-se que o petróleo consiste em uma fonte de energia não renovável e altamente poluente. No Brasil, segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2013), 31,3% da energia em 2012 foi utilizada pelo setor de transportes e, deste total, 70% é proveniente de derivados de petróleo.

Apesar das vantagens apresentadas, os veículos elétricos ainda apresentam alguns desafios a serem superados para sua plena aceitação no mercado, sendo eles:

- **Custo Elevado:** Os veículos elétricos apresentam um custo elevado quando comparado com os veículos convencionais. Isto se deve principalmente à falta de incentivos fiscais por parte dos governos, e também aos elevados custos das baterias e células a combustível, que, embora tenham tido redução nos últimos anos, ainda apresentam custo superior quando comparados aos motores de combustão interna (BARRETO, 1986; OECD; IEA, 2013).
- **Alcance limitado:** Os veículos elétricos ainda possuem um alcance inferior quando comparados aos veículos convencionais, embora este fato também esteja mudando ao longo dos anos. Para ciclos urbanos, os veículos elétricos são indicados tendo em vista que, atualmente, o alcance médio das baterias está em torno de 100 quilômetros. Nos EUA, país onde, em média, dirige-se maiores distâncias por dia, pesquisas mostram que 80% dos motoristas dirigem menos de 100 quilômetros por dia, comprovando a

viabilidade do uso de veículos elétricos para ciclos urbanos (LARMINIE; LOWRY, 2003; OECD; IEA, 2013).

Tendo em vista a retomada do interesse por veículos elétricos, além de suas vantagens ambientais, este trabalho tem por objeto de pesquisa um veículo elétrico de carga leve e autonomia limitada para uso em ciclos curtos. Assim, como objetivo geral, este estudo busca projetar e simular um veículo elétrico de carga leve e uso em ciclos curtos. Para atingir esse objetivo, é necessário que os seguintes objetivos específicos sejam alcançados:

- Levantar o perfil de trabalho do veículo atualmente empregado na coleta de lixo da UFES;
- Modelar os sistemas básicos de um veículo elétrico de carga leve e uso em ciclos curtos;
- Simular e analisar o veículo elétrico.

Para realização e apresentação desta proposta, o presente trabalho segue estruturado em sete capítulos, incluindo esta introdução e a conclusão. Os capítulos 2, 3 e 4 irão tratar, respectivamente, sobre os principais tipos de veículos elétricos, baterias e motores elétricos utilizados em tração. O capítulo 5 irá apresentar fundamentos matemáticos utilizados para a modelagem do veículo elétrico, bem como resultados de projeto e simulação obtidos via MATLAB. Por fim, o capítulo 6 apresentará os resultados da simulação do veículo, em conjunto com seu sistema de controle, via Simulink.

2. TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

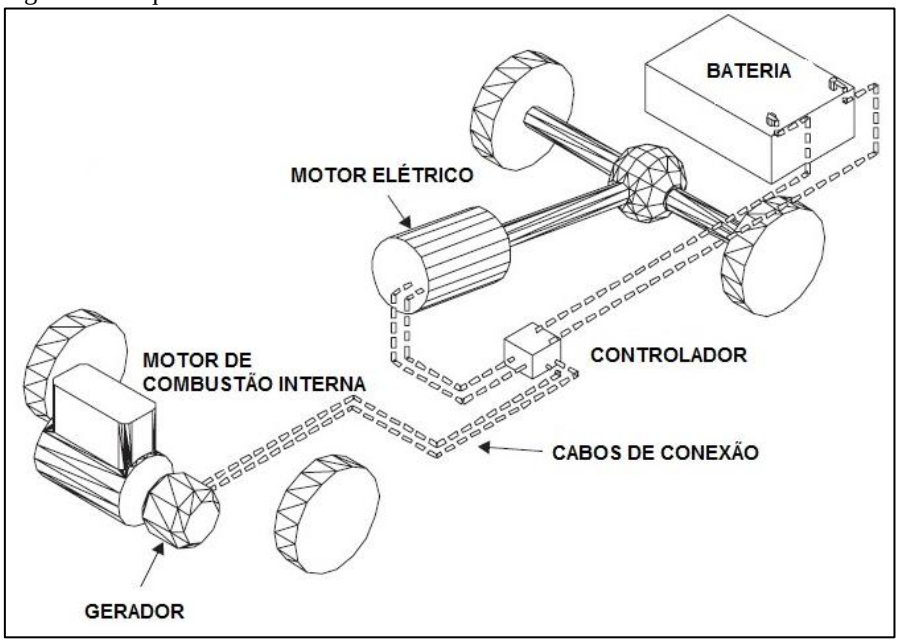
Dentre os principais tipos de veículos elétricos atualmente utilizados, podem-se destacar os veículos totalmente elétricos, que utilizam exclusivamente uma bateria como fonte de energia para um motor elétrico que realiza a tração; os veículos híbridos, veículos que apresentam mais de uma forma de armazenamento ou utilização de energia; e os veículos a célula de combustível, que utilizam um motor elétrico alimentado a partir da conversão de energia química de um combustível – hidrogênio, por exemplo – em energia elétrica (PEREIRA, 2007).

No que diz respeito aos veículos a célula de combustível, estes apresentam a desvantagem de serem mais caros que os veículos convencionais e os veículos puramente elétricos ou híbridos. Outra desvantagem é que as células de combustível normalmente utilizam hidrogênio e este é de difícil armazenamento e transporte (LARMINIE; LOWRY, 2003).

Com relação aos veículos híbridos, que em sua maioria combinam a utilização de um motor de combustão interna em conjunto com um sistema bateria/motor elétrico, destacam-se duas configurações: configuração série e configuração paralela (LARMINIE; LOWRY, 2003). Na configuração série, a tração é realizada por um motor elétrico, que é alimentado por um sistema motor de combustão interna/gerador, por uma bateria ou por ambos ao mesmo tempo (LARMINIE; LOWRY, 2003).

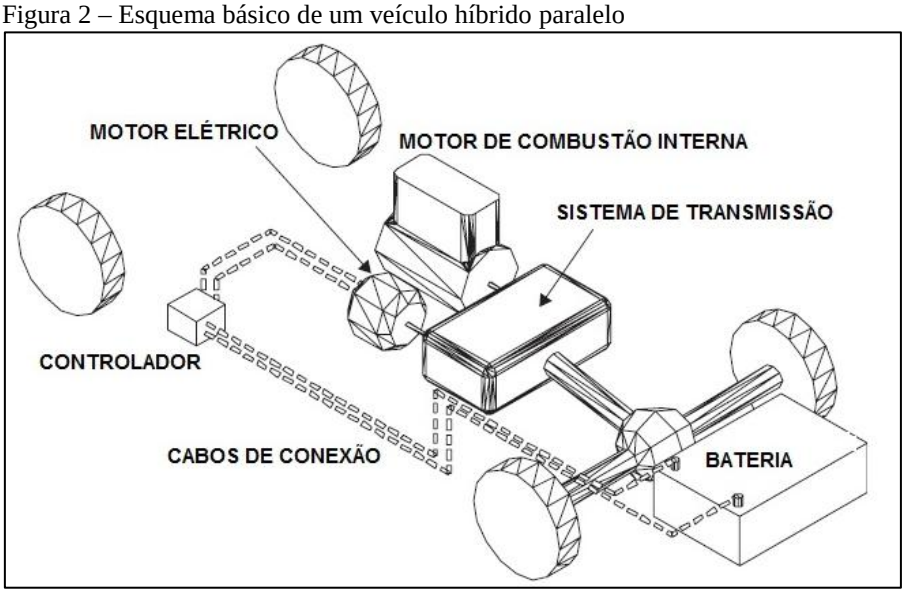
Na configuração paralela, o motor elétrico é geralmente menor que na configuração série, e a tração é realizada pelo motor de combustão interna – por meio de um sistema de transmissão –, em conjunto com um motor elétrico, sendo este último geralmente acoplado às rodas e alimentado por uma bateria (BARRETO, 1986; LARMINIE; LOWRY, 2003). O esquema básico de um veículo híbrido série e de um veículo híbrido paralelo pode ser visto nas figuras 1 e 2, respectivamente.

Figura 1 – Esquema básico de um veículo híbrido série



Fonte: LARMINIE e LOWRY (2003, modificado pelo autor).

Figura 2 – Esquema básico de um veículo híbrido paralelo



Fonte: LARMINIE e LOWRY (2003, modificado pelo autor).

Apesar de não possuírem as mesmas vantagens que os veículos totalmente elétricos, no que diz respeito à redução da poluição ambiental, sonora e eliminação do uso de combustíveis fósseis, os veículos elétricos híbridos são bastante aceitos no mercado, tendo em vista não terem limitação de alcance, dado o uso do motor de combustão interna (LARMINIE; LOWRY, 2003).

Sobre os veículos totalmente elétricos, estes também podem ser classificados da seguinte forma (BARRETO, 1986):

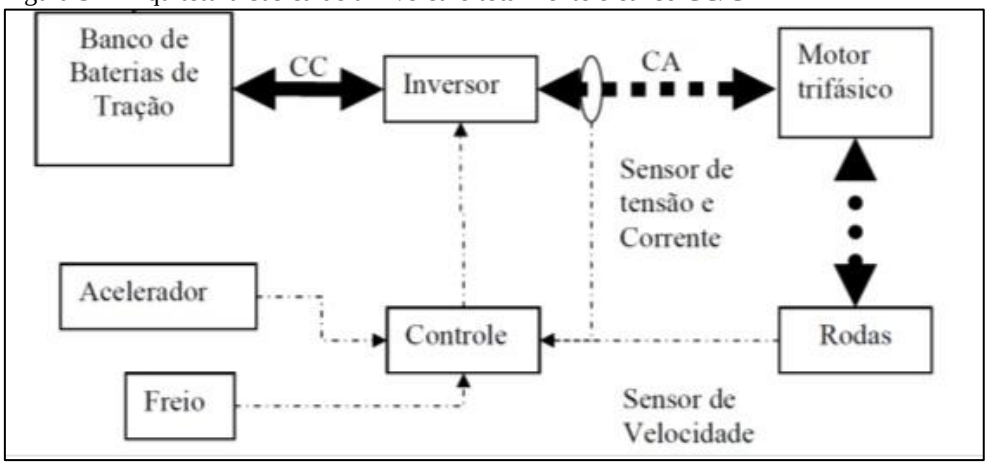
- CC/CC: veículos com fonte de energia e motor em corrente contínua;
- CC/CA: veículos com fonte de energia em corrente contínua e motor em corrente alternada;

Para os motores de tração, os motores em corrente alternada são mais utilizados dado as seguintes vantagens sobre os motores de corrente contínua (BARRETO, 1986):

- **Custo:** para uma mesma potência os motores CC são mais caros que os motores CA de indução;
- **Manutenção:** dado não possuírem escovas e comutadores, os motores CA necessitam de menos manutenção;
- **Relação Peso – Potência:** para uma mesma potência o uso de um motor CA resulta em um veículo mais leve do que se utilizando um motor CC.

Observando-se o que foi apresentado acerca dos tipos de veículos elétricos, neste projeto de graduação optou-se por realizar o dimensionamento e simulação de um veículo totalmente elétrico CC/CA. A arquitetura básica de um veículo totalmente elétrico CC/CA pode ser observada na figura 3.

Figura 3 – Arquitetura básica de um veículo totalmente elétrico CC/CA



Fonte: NOCE (2009, modificado pelo autor).

Na arquitetura apresentada na Figura 3, o controle é feito para o veículo operar em marcha frente e marcha ré, sendo este conhecido como controle em dois quadrantes. Caso a frenagem

regenerativa seja empregada, diz-se que o controle é feito em quatro quadrantes (LARMINIE; LOWRY, 2003).

3. BATERIAS PARA TRAÇÃO ELÉTRICA

Como apresentado no capítulo anterior, em um veículo totalmente elétrico as baterias representam um componente muito importante, tendo em vista que representam a única fonte de energia para que o motor elétrico realize a tração. Outro aspecto importante é que as baterias representam o componente de maior peso/custo em um veículo totalmente elétrico, além de determinar o alcance do veículo, sendo, portanto, fundamental seu correto dimensionamento (LARMINIE; LOWRY, 2003).

Uma bateria pode ser considerada como a conexão de duas ou mais células elétricas, compostas por eletrodos positivos e negativos imersos em um meio eletrólito, responsáveis por converter energia química em energia elétrica, gerando assim uma corrente contínua (LARMINIE; LOWRY, 2003).

As baterias podem ser classificadas como baterias primárias e secundárias. As baterias primárias são aquelas cujo processo químico de geração de energia elétrica não pode ser revertido, ou seja, baterias que não podem ser recarregadas tais como as pilhas alcalinas comuns. As baterias secundárias são aquelas que, obedecidos os critérios de carga (como temperatura, tensão e corrente de carga), podem ser recarregadas por certo número de ciclos, sendo esse o tipo de bateria utilizado nos veículos elétricos. Dentre as principais baterias disponíveis para um veículo totalmente elétrico podem-se destacar as baterias chumbo-ácidas, níquel-cádmio, níquel-hidreto metálico e as baterias íon-lítio (NOCE, 2009).

Para a escolha do tipo de bateria de um veículo elétrico, alguns parâmetros devem ser observados (LARMINIE; LOWRY, 2003):

- **Tensão nominal:** Toda célula elétrica apresenta uma tensão nominal, sendo esta o valor da tensão terminal da bateria quando fornecendo energia. Normalmente as baterias para tração são especificadas para 6V ou 12V podendo ser ligadas em série para se obter um nível de tensão maior. Vale ressaltar que a tensão da bateria não é constante, sofrendo influência da temperatura, profundidade de descarga da bateria, tempo de vida, etc.
- **Capacidade:** A capacidade da bateria é definida por convenção em ampere-hora (Ah). Uma bateria com capacidade de 10 Ah significa que esta bateria pode fornecer uma corrente de 1 ampere por 10 horas ou, teoricamente, 10 amperes por 1 hora, o que para

a maioria das baterias não é verdade. Para a maioria das baterias, quanto mais lenta a carga é retirada, maior será sua capacidade; assim como quanto mais rápido a carga é retirada, menor será sua capacidade. A mudança da capacidade da bateria com a variação da corrente de descarga ocorre em todas as baterias, embora seja mais aparente em alguns tipos de baterias, devido a reações químicas secundárias indesejadas no interior da célula. Assim como a tensão nominal, a capacidade da bateria também pode ser afetada por outros parâmetros, como temperatura, tempo de vida, dentre outros.

- **Energia armazenada:** A energia armazenada em uma bateria é expressa, por convenção, em Watt-hora (Wh). Este valor pode ser obtido multiplicando a tensão terminal do banco, em volts, pela capacidade da bateria, em ampere-hora. Este indicador deve ser usado com cautela, tendo em vista que tanto a tensão terminal quanto a capacidade da bateria sofrem influências externas.
- **Energia específica e densidade de energia:** A energia específica e a densidade de energia são, por convenção, expressas em Watt-hora por quilograma (Wh/kg) e em Watt-hora por metro cúbico (Wh/m³), respectivamente. Estes parâmetros servem para indicar a quantidade de energia acumulada pela bateria por unidade de massa e volume, servindo como uma primeira estimativa para determinação do peso e do volume que o sistema de baterias irá necessitar. Esses parâmetros também devem ser usados com cautela, tendo em vista que dependem da tensão terminal e da capacidade da bateria, que, como dito anteriormente, sofrem influências externas.
- **Potência específica:** Representa a potência, por quilograma, que a bateria pode fornecer (W/kg), sendo este um parâmetro bastante variável, pois depende mais da carga conectada à bateria do que da bateria em si. Apesar disso, a bateria apresenta um valor máximo de potência específica, não sendo indicada sua utilização acima deste valor. Certas baterias apresentam altos valores de energia específica e baixos valores de potência específica, significando que, quando utilizadas em um veículo totalmente elétrico, o veículo poderá atingir longas distâncias, porém de forma lenta. Normalmente altos valores de potência específica resultam em baixos valores de energia específica, sendo que a análise da variação de energia específica com a potência específica representa uma boa ferramenta para comparação entre os diversos tipos de bateria.

- **Taxa de autodescarga:** A maioria das baterias se descarrega quando não estão em uso. Este parâmetro é importante para indicar o tempo que a bateria pode permanecer sem ser recarregada. A autodescarga das baterias ocorre devido a reações químicas instáveis no interior da célula.
- **Número de ciclos de carga e descarga:** Este parâmetro serve para indicar o número de vezes que a bateria pode ser descarregada e carregada novamente sem perda de sua capacidade de armazenamento de energia, ou seja, serve para estimar o tempo de vida da bateria e, consequentemente, os custos de operação do veículo elétrico.

Como visto, diversos são os parâmetros que caracterizam uma bateria, sendo que esses variam de acordo com o tipo de bateria, tal como apresentado a seguir.

3.1. Bateria Chumbo-Ácida

A bateria chumbo-ácida consiste em uma bateria cujas características eletroquímicas são muito bem conhecidas e modeladas, sendo, até recentemente, o tipo de bateria mais utilizada ao redor do mundo (LARMINIE; LOWRY, 2003).

As baterias chumbo-ácidas são amplamente utilizadas em veículos convencionais para realizar a partida do motor de combustão, sendo conhecidas como baterias SLI (do inglês *Starter, Lightning and Ignition*). Essa bateria é classificada como bateria de eletrólito livre, sendo constituída por uma caixa impermeável contendo eletrodos de chumbo imersos em um eletrólito de ácido sulfúrico. Essa bateria apresenta como limitações a geração de gases tóxicos durante as reações químicas, restrições quanto à posição de uso, além de ser necessário, de tempos em tempos, completar a parcela de água destilada perdida durante a evaporação do eletrólito (NOCE, 2009).

Como evolução da bateria chumbo-ácida pode-se citar a bateria VRLA (do inglês *Valve-Regulated Lead-Acid*). Esta, basicamente, é uma bateria SLI composta por uma caixa hermeticamente fechada e por uma válvula reguladora de segurança que não permite a evaporação do eletrólito, eliminando-se assim a necessidade de se completar o nível de água destilada da bateria. Grande parte das baterias automotivas atuais utiliza este tipo de tecnologia, sendo conhecidas como baterias sem manutenção (NOCE, 2009).

No grupo das baterias VRLA, destacam-se ainda as baterias AGM (do inglês *Adsorbed Glass Mat*) sendo estas classificadas como de eletrólito retido, dado que se utilizam, entre as placas metálicas, fibras de vidro dotadas de alta capacidade de absorção, fazendo assim com que o eletrólito líquido fique retido entre as placas. Este tipo de tecnologia reduz a limitação quanto à posição de utilização da bateria (NOCE, 2009).

Como última evolução dentro do grupo das baterias chumbo-ácidas, e consequentemente a de maior custo, destacam-se as baterias chumbo-ácidas a base de gel. Neste tipo de bateria o eletrólito é formado pela mistura do ácido sulfúrico com um composto gelificante a base de sílica, resultando em um eletrólito firme de melhor desempenho do que o das baterias AGM. Nas baterias a gel, utilizam-se separadores de cálcio entre as placas de chumbo (diferente das demais que utilizam separadores de antimônio), sendo comumente chamadas de baterias chumbo-cálcio (NOCE, 2009).

Dentre as características que tornam as baterias chumbo-ácidas interessantes para uso em veículos totalmente elétricos, pode-se destacar o fato de ser uma tecnologia bem conhecida e modelada, como já citado anteriormente, além de ter baixo custo quando comparada a outros tipos de baterias e de possuir baixíssima resistência interna, o que resulta em uma queda de tensão muito pequena quando a bateria está fornecendo energia (LARMINIE; LOWRY, 2003).

Como desvantagens pode-se citar o fato que as baterias chumbo-ácidas apresentam uma taxa de autodescarga relativamente alta (este parâmetro sofre bastante influência da temperatura, sendo que quanto mais quente, maior a taxa de autodescarga), tempo de vida relativamente baixo (em torno de 700 ciclos quando utilizada em veículos elétricos) e, principalmente, o fato de apresentarem baixa energia específica, o que faz com que as baterias chumbo-ácidas fiquem limitadas a veículos para viagens curtas (LARMINIE; LOWRY, 2003).

3.2. Bateria Níquel-Cádmio

Durante algum tempo as baterias níquel-cádmio foram consideradas como as maiores competidoras das baterias chumbo-ácidas, principalmente pelo fato de apresentarem densidade de energia quase duas vezes maior, possibilidade de operar em uma ampla faixa de

temperatura (de -40 a 80°C) e baixas taxas de autodescarga, dado que as reações químicas ocorridas na célula são reações estáveis (LARMINIE; LOWRY, 2003).

Apesar disso, pode-se citar como desvantagem das baterias níquel-cádmio o fato de apresentarem resistência interna maior do que as baterias chumbo-ácidas; tensão de 1,2V por célula, enquanto que as baterias chumbo-ácidas apresentam 2V por célula; custo mais elevado; dificuldade de se obter grandes baterias (fato que faz com que o maior mercado deste tipo de tecnologia seja o de dispositivos eletrônicos); e, por fim, o fato desse tipo de bateria ser sujeito ao chamado efeito "memória" em que cristais são formados no interior da célula caso a bateria seja recarregada antes de se atingir uma descarga completa. A formação dos cristais no interior do eletrólito diminui a capacidade de armazenamento da bateria, fazendo com que ela se descarregue antes do esperado (LARMINIE; LOWRY, 2003; NOCE, 2009).

3.3. Bateria Níquel-Hidreto Metálico

Percebidos os problemas e dificuldades da utilização das baterias níquel-cádmio na tração elétrica, as baterias níquel-hidreto metálico surgiram para efetivamente se mostrarem como uma opção às tradicionais baterias chumbo-ácidas. Este tipo de bateria é de eletrólito retido que apresenta desempenho melhorado quando comparado com as baterias níquel-cádmio, dado que possui maior densidade de energia, menor tempo de recarga, não utiliza cádmio (metal tóxico que eleva o custo da bateria) e não sofre do efeito "memória" (NOCE, 2009).

Com relação à velocidade de recarga, vale ressaltar que esta ocorre de forma tão rápida que, em baterias maiores, como as utilizadas em veículos elétricos, um sistema integrado de arrefecimento se faz necessário, aumentando a complexidade e, consequentemente, o custo da bateria. De forma geral, os principais problemas deste tipo de bateria são uma elevada taxa de autodescarga e um elevado custo, embora este último tenha tendência de diminuir à medida que a tecnologia ganha mercado. Dentre os novos tipos de bateria, a níquel-hidreto metálico mostra-se como uma tecnologia avançada e promissora já sendo inclusive utilizada em veículos elétricos comerciais como o híbrido *Toyota Prius* (LARMINIE; LOWRY, 2003).

3.4. Bateria Íon-Lítio

As baterias íon-lítio representam uma tecnologia bastante utilizada em dispositivos móveis como celulares e notebooks, que começa a ganhar força no uso em tração elétrica. Consiste em uma tecnologia mais cara do que as baterias a base de níquel, porém com maior densidade de energia, maior faixa de temperatura de operação, além de ser menor e mais leve. O ponto de atenção com relação a este tipo de bateria está na sua fragilidade com relação a sobrecargas, sendo necessário o uso de um circuito de proteção, a fim de se evitar danos à bateria (LARMINIE; LOWRY, 2003).

Assim como as baterias níquel-hidreto metálico, as baterias íon-lítio apresentam-se como uma tecnologia desenvolvida e bastante promissora para uso em tração elétrica. Diferentemente das baterias níquel-hidreto metálico – que encontram utilização comercial principalmente em veículos híbridos –, este tipo de bateria já se encontra em utilização em veículos totalmente elétricos, como é o caso do Nissan Leaf e do Mitsubishi MiEV (LARMINIE; LOWRY, 2003).

3.5. Comparativo entre baterias

Como pode ser visto nas seções anteriores, diversos são os tipos de bateria disponíveis para uso em um veículo totalmente elétrico, sendo que cada tecnologia apresenta características específicas. Na tabela 1 é possível observar algumas características das baterias apresentadas neste trabalho.

Tabela 1 – Comparativo entre alguns tipos de baterias disponíveis para uso em veículos elétricos

	Chumbo-ácida	**Níquel-cádmio**	**Níquel-hidreto metálico**	**Íon-Lítio**
Energia específica	20-35 Wh/kg	40-55 Wh/kg	~65 Wh/kg	~90 Wh/kg
Densidade de energia	54-95 Wh/L	70-90 Wh/L	~150 Wh/L	153 Wh/L
Densidade de potência	~250 W/kg	~125 W/kg	200 W/kg	300 W/kg
Taxa de autodescarga	~2% ao dia	0,5% ao dia	5% ao dia	~0,3% ao dia
Número de ciclos	800	1200	~1000	~1000
Tempo de recarga	8 horas	1 hora	1 hora	2-3 horas
Tensão nominal da célula	2 V	1,2 V	1,2 V	3,5 V
Peso estimado para uma bateria de 60 Ah	30 kg	18 kg	15 kg	10 kg
Preço estimado para uma bateria de 60 Ah	R$ 225,00	R$ 450,00	R$ 550,00	R$ 750,00

Fonte: LARMINIE e LOWRY (2003, modificado pelo autor).

Como pode ser visto na tabela 1, as baterias do tipo chumbo-ácida atualmente não representam a tecnologia mais interessante para uso em veículos elétricos. Apesar disso, como este trabalho tem por objetivo projetar e simular, de forma simples, um veículo de baixa autonomia, esta bateria será a escolhida, dado a maior facilidade de modelagem, além do baixo custo em uma eventual construção de um protótipo do veículo.

4. MOTORES ELÉTRICOS

Assim como as baterias, o motor elétrico, em conjunto com seu sistema de controle, consiste em uma parte fundamental de um veículo totalmente elétrico, tendo em vista que este é o sistema responsável por efetivamente realizar a tração do veículo. Diversos são os motores que podem ser utilizados em um veículo elétrico, sendo que os principais são os motores de corrente contínua, motores de indução, motores de relutância chaveada e os motores CC sem escovas (TANAKA, 2013).

Apesar das diferenças entre os tipos de motores, algumas características são desejáveis para que uma máquina elétrica seja utilizada em tração (BARRETO, 1986):

- alto torque em baixas velocidades;
- capacidade de operar com potência constante;
- alta densidade de torque e de potência;
- alta robustez;
- custo aceitável.

A seguir serão apresentadas algumas características básicas dos motores citados e de seus sistemas de controle.

4.1. Motor de corrente contínua

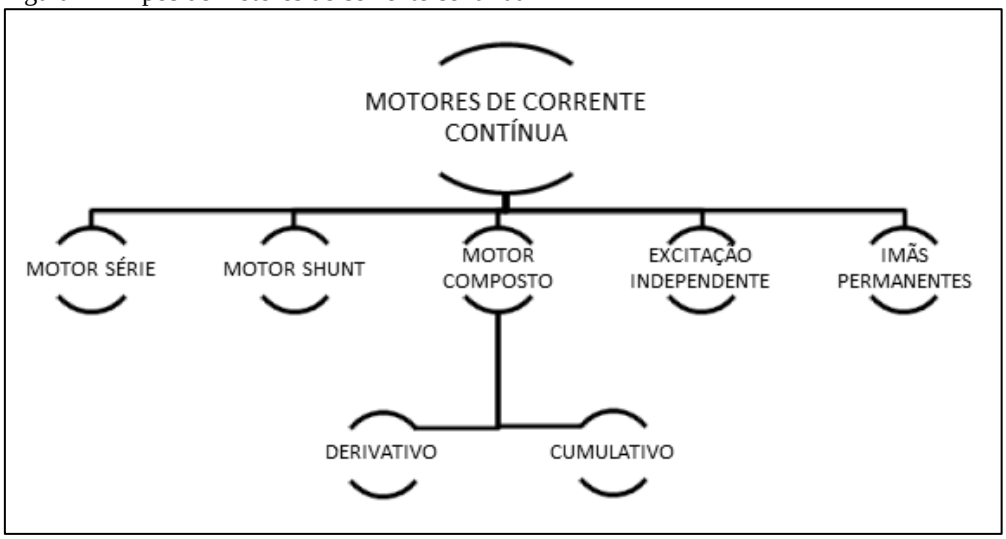
Dentre os tipos de motores disponíveis para tração elétrica, o motor de corrente contínua foi o primeiro a ser utilizado, por sua simplicidade e facilidade de controle. Atualmente, com o avanço da eletrônica de potência que possibilitou o controle de outros tipos de motores, as máquinas de corrente contínua perderam espaço no que se refere ao uso em tração elétrica (PEREIRA, 2007).

Neste tipo de motor, o controle pode ser feito de forma relativamente simples a partir da variação da tensão de alimentação (utilizando-se conversores CC/CC do tipo *chopper* ou recortadores) ou a partir da variação do fluxo magnético, sendo este último tipo de controle possível apenas em motores que utilizam bobinas, ao invés de imãs permanentes, para geração do fluxo magnético. Vale ressaltar que o controle por variação do fluxo é indicado para casos

de operação em altas velocidades com baixo torque, condição que resulta em elevadas perdas no ferro caso o fluxo magnético não seja reduzido. De forma geral, pode-se dizer que os motores de corrente contínua consistem em uma tecnologia bem madura e com bastante flexibilidade de controle, principalmente se o controle por fluxo for aplicável (LARMINIE; LOWRY, 2003).

Os motores de corrente contínua podem ser classificados de acordo com o tipo de material utilizado para fornecer o fluxo magnético e da forma como os enrolamentos do motor são conectados, tal como mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Tipos de motores de corrente contínua



Fonte: BALDISSERA (2012).

Dentre os motores apresentados na Figura 4, destacam-se para tração elétrica o motor série e o motor com excitação independente. No motor série, os enrolamentos de campo e de armadura são conectados em série e consequentemente percorridos pela mesma corrente. Esse tipo de motor apresenta como característica principal o fato de o torque ser alto para baixas velocidades e de cair rapidamente à medida que a velocidade aumenta, sendo esta característica interessante em algumas aplicações, tais como uso em locomotivas diesel-elétricas, por exemplo (LARMINIE; LOWRY, 2003). Usualmente os motores série são considerados os motores que apresentam o maior torque, por unidade de corrente de excitação, dentre todos os motores elétricos (BARRETO, 1986).

Sobre os motores com excitação independente, destaca-se o fato de que nesses motores utilizam-se duas fontes CC independentes, sendo uma para alimentação da armadura e uma para alimentação do campo. Os motores com excitação independente permitem a utilização do

controle de velocidade tanto por variação da tensão de alimentação quanto por variação do fluxo, o que permite variar, com grande flexibilidade, as características de torque/velocidade do motor.

4.2. Motor de indução

Os motores de indução, assim como os motores CC, consistem em uma tecnologia bastante madura e amplamente empregada na indústria em geral. Este tipo de motor necessita de uma fonte CA para sua alimentação, o que durante muitos anos impossibilitou seu uso em veículos elétricos (onde a fonte de energia é usualmente do tipo CC). Atualmente, com o avanço da eletrônica de potência e o surgimento dos inversores de frequência (dispositivos de controle capazes de gerar um sinal CA a partir de um sinal CC), o uso dos motores de indução em tração elétrica não é mais um problema (LARMINIE; LOWRY, 2003).

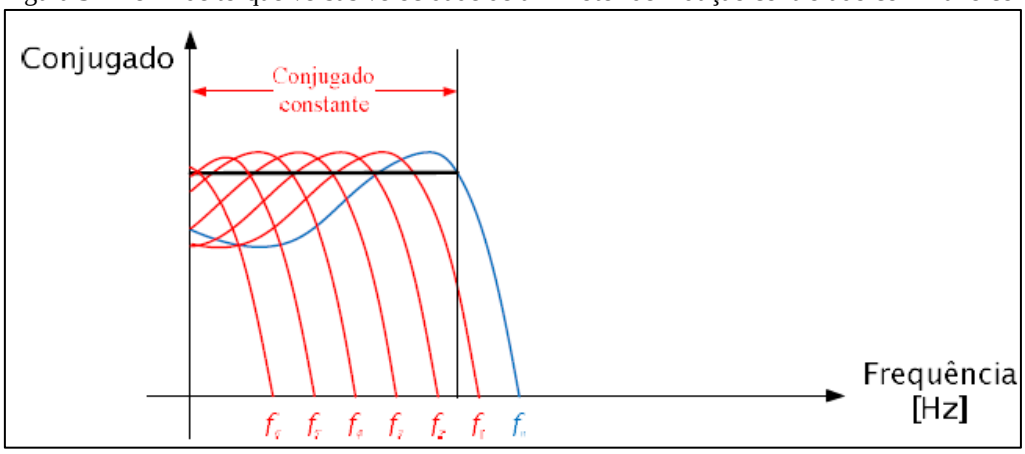
Nesse tipo de motor, o estator é composto por três conjuntos de bobinas alimentadas por uma fonte CA, que são responsáveis por induzir correntes no rotor e, consequentemente, realizar a rotação da máquina. Nos motores de indução, a frequência da fonte de alimentação do estator determina a velocidade de rotação da máquina. Sendo assim, diferentemente das máquinas de corrente contínua, o controle de velocidade é comumente realizado a partir da frequência da fonte de alimentação e não mais pelo valor da amplitude (BARRETO, 1986).

Outra característica acerca dos motores de indução é que neste tipo de máquina o torque máximo depende da intensidade do fluxo magnético entre o rotor e as bobinas do estator, sendo que este fluxo depende da corrente de magnetização. Para um motor alimentado em tensão constante, o aumento da frequência da fonte de alimentação resulta em uma diminuição da corrente de magnetização, dado o aumento da impedância das bobinas de campo e, consequentemente, diminuição do fluxo.

Dessa forma, em um sistema de controle em que a tensão de saída do inversor seja mantida constante o torque máximo do motor será inversamente proporcional a sua velocidade (LARMINIE; LOWRY, 2003). Caso o controle seja efetuado de modo que com a variação da velocidade a saída do inversor também seja variada – de modo a manter constante a relação tensão/frequência –, não ocorrerá variação do fluxo e, consequentemente, no valor do torque máximo do motor (BARRETO, 1986). Nas figuras 5 e 6 é possível visualizar as

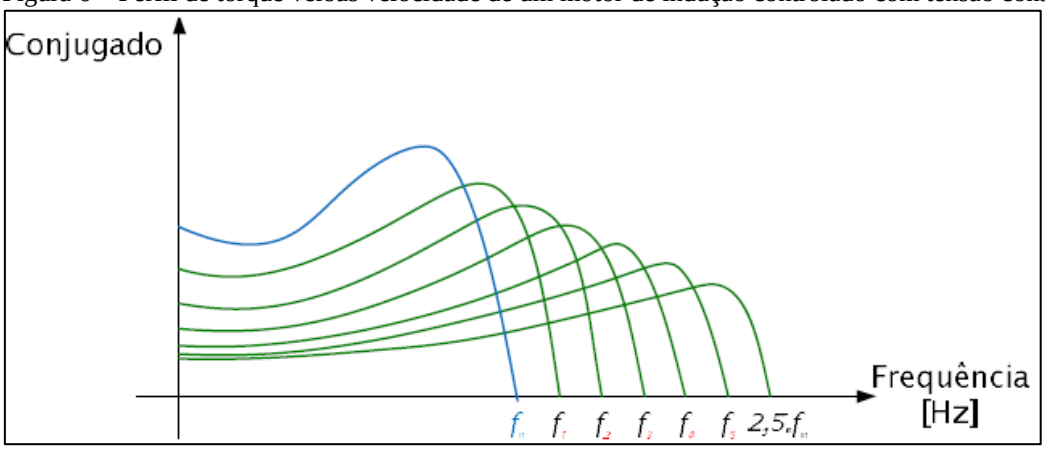
características de torque versus velocidade de um motor de indução controlado com fluxo constante e com tensão constante, respectivamente, e frequência variável.

Figura 5 – Perfil de torque versus velocidade de um motor de indução controlado com fluxo constante



Fonte: BORBA (2011).

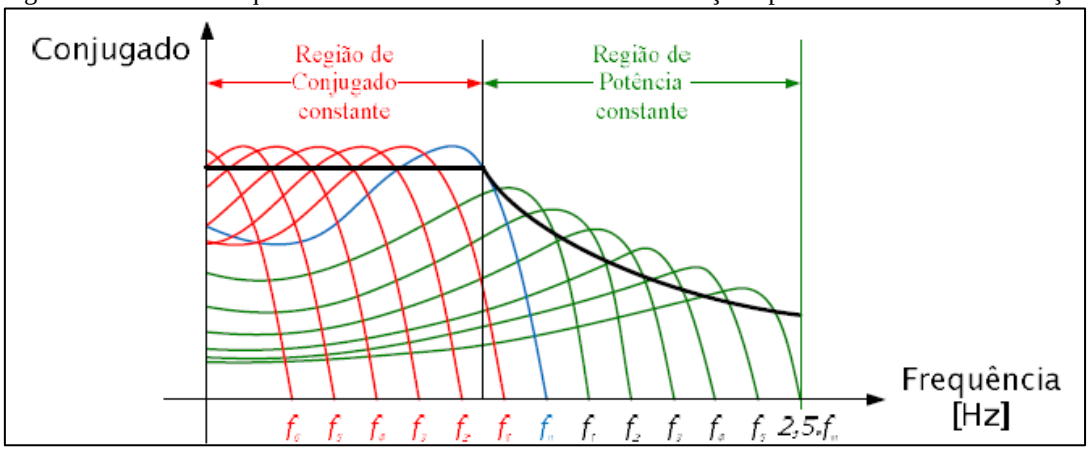
Figura 6 – Perfil de torque versus velocidade de um motor de indução controlado com tensão constante



Fonte: BORBA (2011).

Em tração elétrica é comum realizar uma combinação do controle com fluxo constante e do controle com tensão constante. Observa-se que o controle com fluxo constante é utilizado na partida do motor, sendo esta uma condição em que se opera com torque máximo. Já o controle com tensão constante é utilizado após atingir-se o valor nominal da tensão do motor, condição a partir da qual se opera em potência constante. O perfil de torque versus velocidade obtido utilizando a combinação do controle com fluxo constante em conjunto com o controle com tensão constante é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Perfil de torque versus velocidade de um motor de indução tipicamente utilizado em tração elétrica



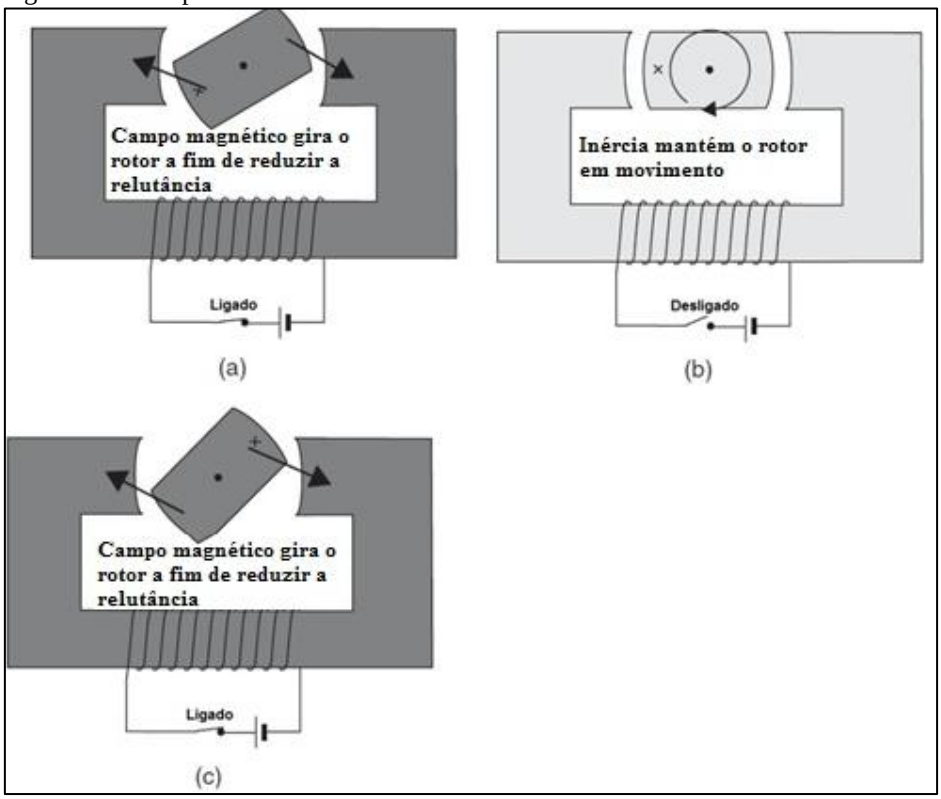
Fonte: BORBA (2011).

4.3. Motor de relutância chaveada

Embora só recentemente o motor de relutância chaveada tenha começado a ser utilizado em veículos elétricos, esse tipo de motor pode ser considerado um dos mais simples dentre os motores utilizados em tração elétrica (LARMINIE; LOWRY, 2003). Esse motor consiste basicamente em um estator bobinado e um rotor com saliências, os quais originam o torque de relutância e eliminam a necessidade de enrolamentos no rotor, simplificando assim a construção da máquina (BALDISSERA, 2012).

O motor de relutância chaveada é projetado para que a indutância varie de acordo com a posição do rotor, sendo que só existe a produção de torque em pontos onde exista variação de relutância (PEREIRA, 2007). O princípio de funcionamento do motor pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Princípio de funcionamento de um motor de relutância chaveada



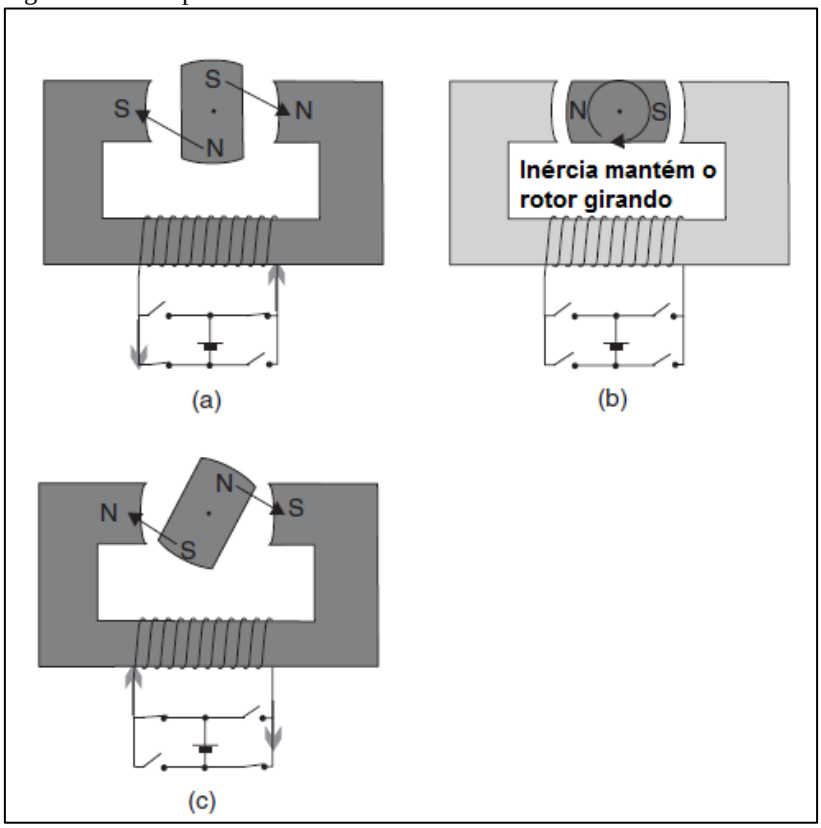
Fonte: LARMINIE e LOWRY (2003, modificado pelo autor).

Da Figura 8 é possível observar que, apesar de seu aspecto construtivo simples, os motores de relutância chaveada apresentam um controle de certa forma complexo, tendo em vista que é necessário saber a posição exata do rotor, normalmente por meio de sensores de posição, para que seja feito um controle cuidadoso dos pulsos de alimentação (LARMINIE; LOWRY, 2003).

4.4. Motor CC sem escovas

Apesar do nome motor CC, este tipo de motor consiste na verdade em um motor CA, sendo que o nome CC vem do fato da corrente alternada do motor necessitar ser de frequência variável e proveniente de uma fonte CC, além do fato deste tipo de motor apresentar características de torque e velocidade muito parecidas com os motores CC convencionais. Vale ressaltar que devido à confusão que o nome motor CC sem escovas provoca, esse motor também é comumente chamado de motor síncrono de ímãs permanente. Nesse tipo de motor o rotor é composto por um imã permanente, sendo seu princípio básico de funcionamento mostrado na Figura 9 (LARMINIE; LOWRY, 2003).

Figura 9 – Princípio de funcionamento de um motor CC sem escovas



Fonte: LARMINIE e LOWRY (2003, modificado pelo autor).

O motor CC sem escovas é normalmente controlado via inversores, sendo necessário sincronizar os pulsos de corrente com a posição do rotor, tal como no motor de relutância chaveada, sendo este sincronismo também realizado normalmente via sensores de posição (LARMINIE; LOWRY, 2003).

Esse motor apresenta como características o fato de possuir um elevado rendimento – devido ao fato de não serem induzidas correntes no rotor, tendo em vista que este é constituído por um imã permanente – e uma alta densidade de potência, sendo atualmente o maior competidor dos motores de indução tanto em tração elétrica como em diversas outras aplicações (PEREIRA, 2007).

4.5. Comparativo entre motores

Assim como no capítulo 3, que tratou das baterias utilizadas em tração elétrica, neste capítulo também foi possível observar que diversos são os tipos de motores disponíveis para aplicação

em um veículo elétrico. Na tabela 2, em que se atribui notas de 0 a 5 para cada característica analisada, é possível observar um comparativo entre os motores apresentados.

Tabela 2 – Comparativo entre motores comumente utilizados em tração elétrica

	CC	**Indução**	**CC sem escovas**	**Motor de relutância chaveada**
Densidade de potência	2	3	5	3
Eficiência	2	3	5	3
Controle	5	3	4	3
Confiabilidade	3	5	4	5
Maturidade	5	5	4	3
Custo	3	5	2	4
Total	**20**	**24**	**24**	**21**

Fonte: CHAU e WANG (2005, modificado pelo autor).

Como pode ser visualizado na Tabela 2, os motores de indução e os CC sem escovas são os motores mais indicados para utilização em um veículo elétrico. Neste projeto de graduação será simulada a utilização de um motor de indução, novamente objetivando baixo custo em uma eventual construção de um protótipo do veículo.

5. MODELAGEM DO VEÍCULO ELÉTRICO

Para a realização da modelagem e simulação do veículo elétrico, foi necessário inicialmente levantar dados a respeito do veículo atualmente utilizado na coleta de lixo na UFES. Hoje a UFES utiliza para coleta de lixo um trator modelo 4230.4 Cargo do fabricante Agrale, tal como mostrado na Figura 10. Esse veículo tem 1.325 kg de peso operacional, além de uma capacidade máxima de carga de 1.546 kg, conforme dados do fabricante.

Figura 10 – Veículo atualmente utilizado na coleta de lixo na UFES

Fonte: AGRALE (2014).

Uma estimativa do ciclo de trabalho do veículo também foi necessária, sendo esta obtida a partir do acompanhamento, realizado pelo próprio autor, de uma viagem de coleta de lixo. Os resultados obtidos a respeito do ciclo de trabalho do veículo podem ser visualizados a seguir:

- Distância percorrida em um dia de trabalho: 17 km.
- Velocidade média: 18 km/h.
- Tempo total requerido em um dia de trabalho: 4 horas.
- Parcela do tempo requerido em que o veículo está efetivamente sendo tracionado: 62%.

É possível observar que o veículo percorre uma distância relativamente curta ao longo de um dia de trabalho; o tempo efetivamente tracionando é pequeno; e opera em baixa velocidade. Todos esses fatores simplificam o projeto do veículo elétrico, sendo o peso bruto (2.871 kg) o único problema inicialmente observado, por ser uma massa relativamente elevada, afetando assim a potência do motor e o tamanho do banco de baterias. Vale ressaltar que é provável

que a carga de lixo da UFES esteja abaixo dos 1.546 kg que o veículo suporta, dado que o lixo da UFES consiste em uma carga, em sua maioria, de bastante volume e baixa densidade. Como não foi possível obter informação a respeito da carga efetivamente transportada em uma viagem de coleta de lixo, optou-se por realizar o projeto com a carga máxima especificada pelo fabricante.

De posse das informações a respeito do atual veículo coletor de lixo na UFES e de seu ciclo de trabalho, foi possível iniciar o projeto e a simulação do veículo elétrico, como apresentados a seguir.

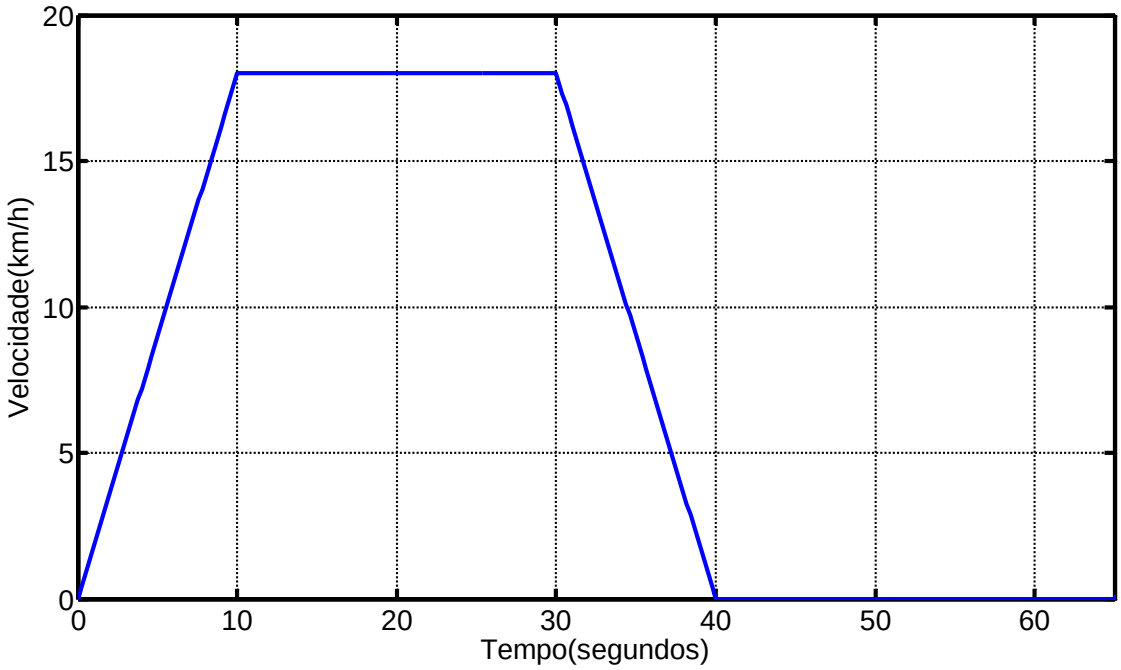
5.1. Modelagem do ciclo de trabalho

Para a modelagem do ciclo de trabalho do motor, adotou-se, por simplicidade, um ciclo periódico com as seguintes características:

- Veículo parte do repouso e atinge a velocidade de 18 km/h em 10 segundos.
- Veículo mantém a velocidade de 18 km/h por 20 segundos.
- Veículo desacelera até atingir o repouso em 10 segundos.
- Veículo permanece parado por 25 segundos.
- O ciclo se repete mais 114 vezes para que o veículo atinja os 17 quilômetros percorridos ao longo de um dia de trabalho.

O ciclo descrito acima foi simulado no MATLAB a partir do código que pode ser conferido no APÊNDICE A, sendo o resultado apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Simulação do ciclo de trabalho do veículo



Fonte: Produção do próprio autor.

5.2. Modelagem do esforço de tração

O conhecimento do esforço de tração solicitado ao veículo é importante, tendo em vista que a partir dele é possível conhecer a potência solicitada no eixo do motor, bem como a potência na entrada do motor (utilizada para realizar o dimensionamento do banco de baterias). Para modelagem do esforço de tração quatro forças devem ser definidas (TANAKA, 2013): força de resistência ao rolamento, força de arrasto aerodinâmico, força de resistência ao aclive (caso o veículo esteja subindo ou descendo um terreno inclinado) e força de aceleração (caso a velocidade não seja constante).

5.2.1. Força de resistência ao rolamento

A força de resistência ao rolamento, também conhecida como rolamento de fricção ou arraste de rolamento, ocorre quando um objeto redondo rola sobre uma superfície plana. A força de resistência ao rolamento depende basicamente do tipo de material do pneu e do solo, sendo modelada pela equação (1) a seguir (TANAKA, 2013):

$$F_{rr} = \mu . m . g \tag{1}$$

onde:

F_{rr}: força de resistência ao rolamento em newtons;

μ: coeficiente, adimensional, de atrito ao rolamento;

m: massa total do veículo em quilogramas;

g: aceleração da gravidade em metros por segundo ao quadrado.

Com relação ao coeficiente de atrito ao rolamento, neste trabalho será considerado um valor de 0,015, típico para um pneu convencional. Vale ressaltar que este coeficiente pode assumir valores em torno de 0,005 para pneus com desenvolvimento especial (LARMINIE; LOWRY, 2003).

5.2.2. Força de arrasto aerodinâmico

A força de arrasto aerodinâmico consiste na força de resistência que o ar faz ao movimento do veículo. Esta força varia de acordo com a área frontal, formato e velocidade do veículo, que pode ser dada pela equação (2) a seguir (TANAKA, 2013):

$$F_{ad} = \frac{1}{2} . \rho . A_{f.} C_d . V(t)^2 \tag{2}$$

onde:

F_{ad}: força de arrasto aerodinâmico, em newtons;

ρ: densidade volumétrica do ar, em quilograma por metro cúbico;

A_f: área frontal do veículo, em metros quadrados;

C_d: coeficiente, adimensional, de arrasto;

$V(t)$: velocidade, no instante t, em metros por segundo.

Observa-se que para regiões ao nível do mar (como é o caso de Vitória – ES) a densidade volumétrica do ar pode ser adotada como sendo 1,2 kg/m³ (AMARANTE; SILVA; ANDRADE, 2009). O coeficiente de arrasto está relacionado com o formato do veículo, sendo que para veículos sem um projeto aerodinâmico bem definido este coeficiente assume valores na ordem de 0,7 (LARMINIE; LOWRY, 2003). Por fim, a área frontal do veículo foi

estimada a partir de medições realizadas pelo próprio autor, em que se obteve um valor de aproximadamente 1 m².

5.2.3. Força de resistência ao aclive

A força de resistência ao aclive consiste basicamente na componente do peso do veículo que atua no sentido da rampa. Caso o veículo esteja subindo a rampa, esta componente se opõe ao movimento; caso esteja descendo a rampa, ela ajuda o movimento. A força de resistência ao aclive pode ser modelada conforme a equação (3) (TANAKA, 2013):

$$F_{ra} = m.g.sen(\alpha) \tag{3}$$

onde:

F_{ra}: força de resistência ao aclive, em newtons;

m: massa total do veículo, em quilogramas;

g: aceleração da gravidade, em metros por segundo ao quadrado;

α: ângulo de inclinação.

5.2.4. Força de aceleração

Caso a velocidade do veículo não seja constante claramente uma força será necessária para realizar a aceleração do veículo, sendo esta força dada pela segunda lei de Newton mostrada na equação (4) (LARMINIE; LOWRY, 2003):

$$F_a = m.a \tag{4}$$

onde:

F_a: força de aceleração linear, em newtons;

m: massa total do veículo, em quilogramas;

a: aceleração do veículo, em metros por segundo ao quadrado.

Observa-se que para um modelo mais apurado é necessário considerar o efeito da aceleração angular, componente necessária para acelerar as partes girantes do veículo. Observa-se, porém, que na prática a força de aceleração linear será muito maior do que a força de aceleração angular, sendo uma aproximação razoável a de aumentar ligeiramente a massa do

veículo na equação (4) e simplesmente desconsiderar o efeito da aceleração angular (LARMINIE; LOWRY, 2003).

5.2.5. Força de tração

Tendo em vista todas as forças que atuam no movimento do veículo, a força de tração total nas rodas pode ser dada pela equação (5) (LARMINIE; LOWRY, 2003):

$$F_t = F_{rr} + F_{ad} + F_{ra} + F_a \tag{5}$$

onde:

F_t: força de tração, em newtons;

F_{rr}: força de resistência ao rolamento, em newtons, dada pela equação (1);

F_{ad}: força de arrasto aerodinâmico, em newtons, dada pela equação (2);

F_{ra}: força de resistência ao aclive, em newtons, dada pela equação (3);

F_a: força de aceleração linear, em newtons, dada pela equação (4).

5.3. Modelagem da potência do motor

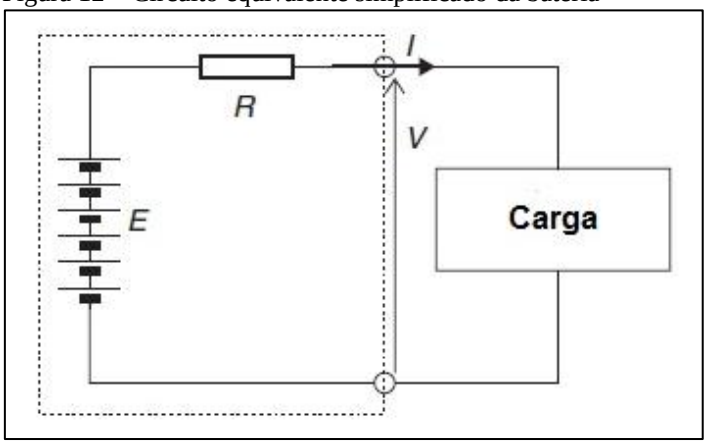
De posse das informações a respeito da força de tração nas rodas do veículo, é possível facilmente obter os valores da potência do motor no eixo e na entrada. Observa-se que a potência de tração nas rodas pode ser obtida multiplicando-se a força de tração pela velocidade linear do veículo. A potência requerida no eixo do motor pode ser obtida dividindo-se a potência de tração nas rodas pela eficiência do sistema de transmissão, sendo que para sistemas de transmissão simples a eficiência fica na faixa de 95% (LARMINIE; LOWRY, 2003).

A potência na entrada do motor pode ser obtida dividindo-se a potência no eixo do motor pela eficiência do motor (aqui considerada como sendo 88%) caso o veículo esteja sendo tracionado. Caso o veículo esteja desacelerando, tem-se que a potência na entrada do motor deverá ser diminuída, multiplicando a potência no eixo pela eficiência do motor, tendo em vista que a própria ineficiência do motor o ajuda a desacelerar (LARMINIE; LOWRY, 2003).

5.4. Modelagem das baterias

Para a modelagem das baterias adotou-se como base o circuito equivalente simplificado mostrado na Figura 12, que embora não explique o comportamento dinâmico das baterias, para as simulações de interesse neste trabalho será um modelo apropriado.

Figura 12 – Circuito equivalente simplificado da bateria



Fonte: LARMINIE E LOWRY (2003, modificado pelo autor).

Dentre os parâmetros apresentados na Figura 12, o de modelagem mais simples consiste na resistência interna, que neste trabalho será considerada constante, com valor aproximado conforme a equação (6) (LARMINIE; LOWRY, 2003):

$$\mathrm{R} = n * \frac{0{,}022}{C10} \tag{6}$$

onde:

R: resistência interna da bateria, em ohms;

n: número de células da bateria;

$C10$: capacidade da bateria, em ampère-hora, tomando como referência um tempo de descarga de 10 horas.

Com relação ao número de células da bateria (n) utilizado na equação (6), para uma bateria chumbo-ácida, uma boa aproximação é considerá-lo igual ao valor da tensão nominal dividido por dois, por exemplo, uma bateria de 12 volts nominais apresenta um total de 6 células. Apesar da simplicidade do modelo apresentado na Figura 12, deve-se ter em mente que ele não é totalmente invariável. Cita-se aqui, por exemplo, o fato da tensão de circuito aberto (E)

possuir forte influência do nível de descarga da bateria, tal como mostrado na equação (7) (LARMINIE; LOWRY, 2003).

$$\mathrm{E} = n * [2.15 - D(2.15 - 2)] \tag{7}$$

onde:

E: tensão de circuito aberto da bateria, em volts;

n: número de células da bateria;

D: profundidade de descarga da bateria sendo 0 totalmente carregada e 1 totalmente descarregada .

Observa-se da equação (7) que no modelo adotado, uma bateria convencional de tensão nominal 12 volts apresenta tensão a vazio maior do que o valor nominal, quando totalmente carregada. Nota-se também que a tensão a vazio atinge o valor de 12 volts quando a bateria está totalmente descarregada, ponto a partir do qual, na prática, a bateria entra em colapso.

A tensão de circuito aberto de uma bateria é um parâmetro muito importante para ser utilizado em uma simulação de um veículo elétrico, sendo que neste trabalhou utilizou-se uma função em MATLAB para realizar este cálculo, que pode ser conferida no APÊNDICE B.

Para fins de simulação, é interessante obter uma aproximação da corrente drenada da bateria para suprir uma dada potência. A partir da potência no terminal da bateria (produto entre a tensão terminal e a corrente de bateria) e observando o modelo de bateria apresentado na figura 12, é possível encontrar a corrente de bateria tal como apresentada na equação (8) (LARMINIE; LOWRY, 2003).

$$\mathrm{I} = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4RP}}{2R} \tag{8}$$

onde:

I: corrente da bateria, em ampere;

E: tensão de circuito aberto da bateria, em volt;

R: resistência interna da bateria, em ohms;

P: potência suprida pela bateria.

De posse da informação da corrente da bateria, é possível estimar o valor da descarga da mesma a partir da modelagem de sua capacidade. Como dito anteriormente, uma bateria de 10 Ah pode fornecer uma corrente de 1 ampere por 10 horas, porém isto não quer dizer que a bateria poderá fornecer 10 amperes por 1 hora. O fato de uma bateria apresentar uma capacidade diferente dependendo do valor da corrente de descarga pode ser modelado conforme a equação (9) (LARMINIE; LOWRY, 2003):

$$C_p = I^k * T \tag{9}$$

onde:

C_p: capacidade de Peukert, assumida constante, em ampere-hora;

I: corrente de descarga em ampere;

k: coeficiente de Peukert;

T: tempo de descarga da bateria em horas.

A equação (9) assume que a bateria será descarregada totalmente por uma corrente I em um tempo T. Dado que o coeficiente de Peukert de baterias chumbo-ácidas de boa qualidade é próximo de 1,2, o fato de aumentar a corrente de descarga I faz com que a bateria reconheça de fato uma corrente I^k e, consequentemente, diminua seu tempo de duração. Embora a equação (9) represente uma boa aproximação para o tempo de duração da bateria, a mesma apresentará maior precisão quanto maior for o valor da corrente de descarga (LARMINIE; LOWRY, 2003).

Dessa forma, é possível estimar a profundidade de descarga D de uma bateria, após ser descarregada por uma corrente I em um intervalo de tempo T tal como mostrado na equação (10) (LARMINIE; LOWRY, 2003):

$$\mathrm{D} = \frac{I^k * T}{C_p} \tag{10}$$

onde:

D: profundidade de descarga da bateria sendo 0 totalmente carregada e 1 totalmente descarregada;

I: corrente de descarga, em ampere;

T: tempo de descarga da bateria em horas;

C_p: capacidade de Peukert, em ampere-hora;

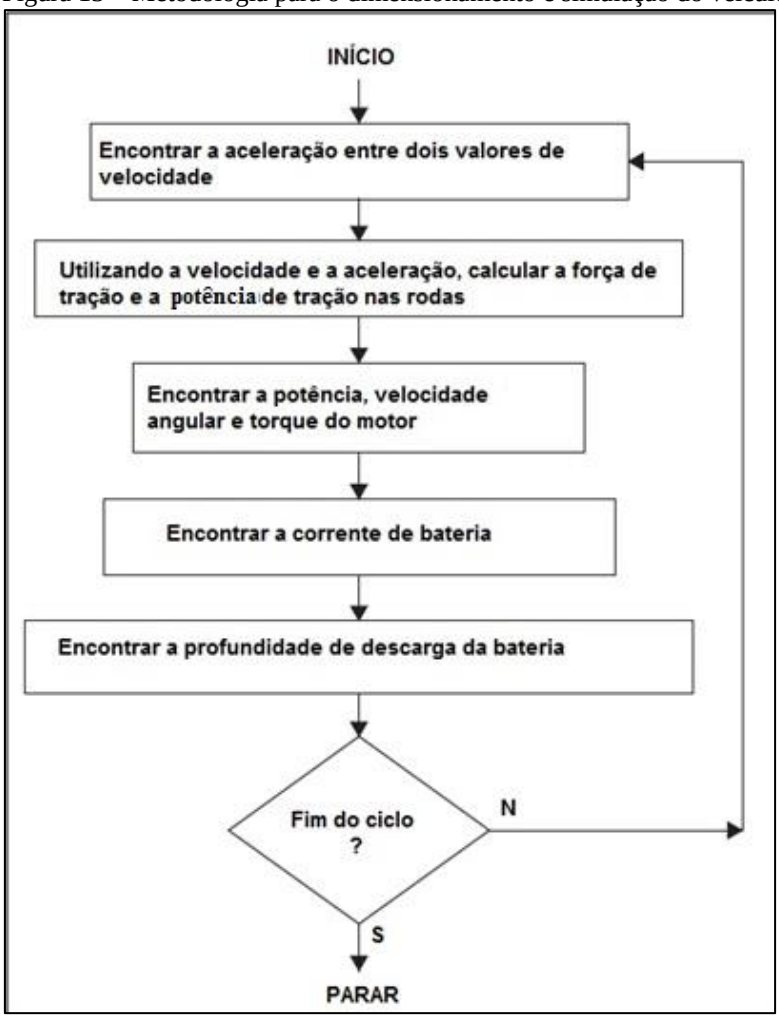
k: coeficiente de Peukert.

De posse de toda a modelagem apresentada até aqui é possível realizar uma simulação simplificada de um veículo elétrico tal como será apresentado na sessão seguinte.

5.5. Projeto e simulação

Para o projeto e a simulação do veículo elétrico, foi utilizado o código em MATLAB (APÊNDICE C) baseado na metodologia apresentada na Figura 13.

Figura 13 – Metodologia para o dimensionamento e simulação do veículo elétrico



Fonte: LARMINIE E LOWRY (2003, modificado pelo autor).

O projeto foi realizado adotando-se como premissa a utilização de um motor de indução de quatro polos (velocidade síncrona de 1800 rpm) em conjunto com um redutor de velocidade.

Um redutor de velocidade consiste basicamente em um conjunto de engrenagens em que, dado uma rotação e um torque de entrada (provenientes do motor elétrico), tem-se na saída (rodas do veículo) uma menor rotação e um maior torque, ambos proporcionais à relação de transmissão. A relação de transmissão de um veículo pode ser obtida conforme a equação (10) (HUSAIN, 2005):

$$\mathrm{G} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{n_1}{n_2} \tag{11}$$

onde:

G: relação de transmissão;

T_1: torque de entrada;

T_2: torque de saída;

n_1: rotação de entrada;

n_2: rotação de saída.

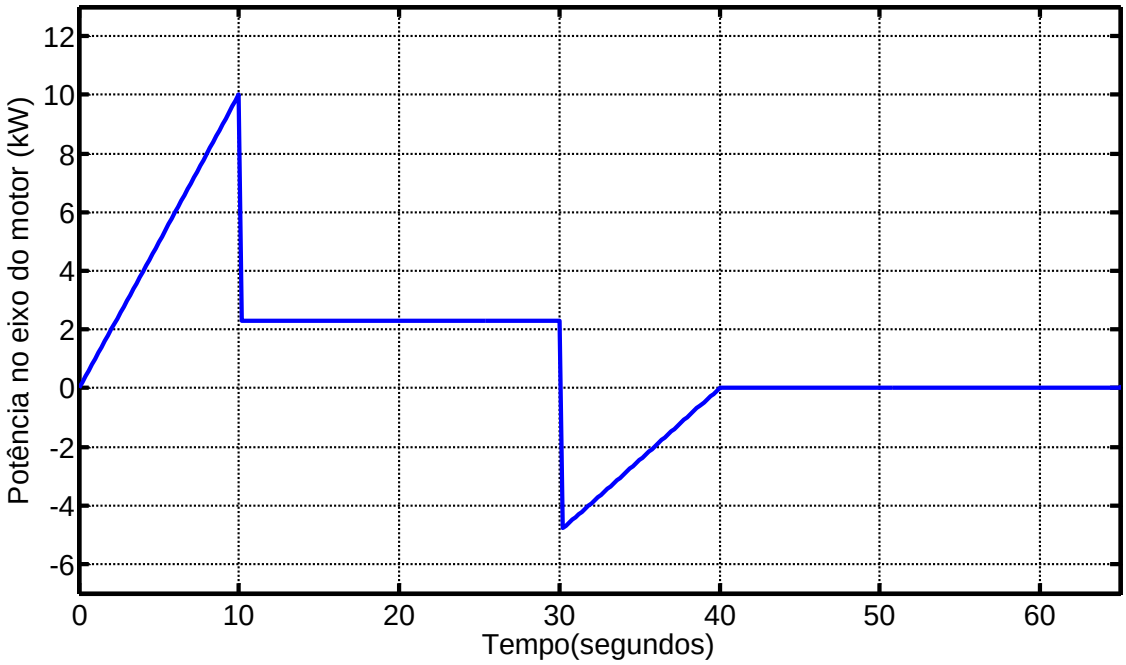
Observa-se que, para que o veículo atinja 18 km/h com o motor elétrico operando próximo de sua velocidade nominal – dado que a roda do veículo possui um diâmetro de aproximadamente 66 centímetros (informação obtida a partir de medições realizadas pelo próprio autor) – deve-se usar um redutor de relação de transmissão máxima de 12:1, sendo esta a relação adotada.

Com relação ao banco de baterias, a simulação foi efetuada com 7 baterias chumbo-ácidas modelo UB-30, fabricante UPG, com as seguintes características principais (UPG, 2014):

- Tensão nominal da bateria: 12V.
- Capacidade da bateria para um tempo de descarga de 1 hora: 60 Ah.

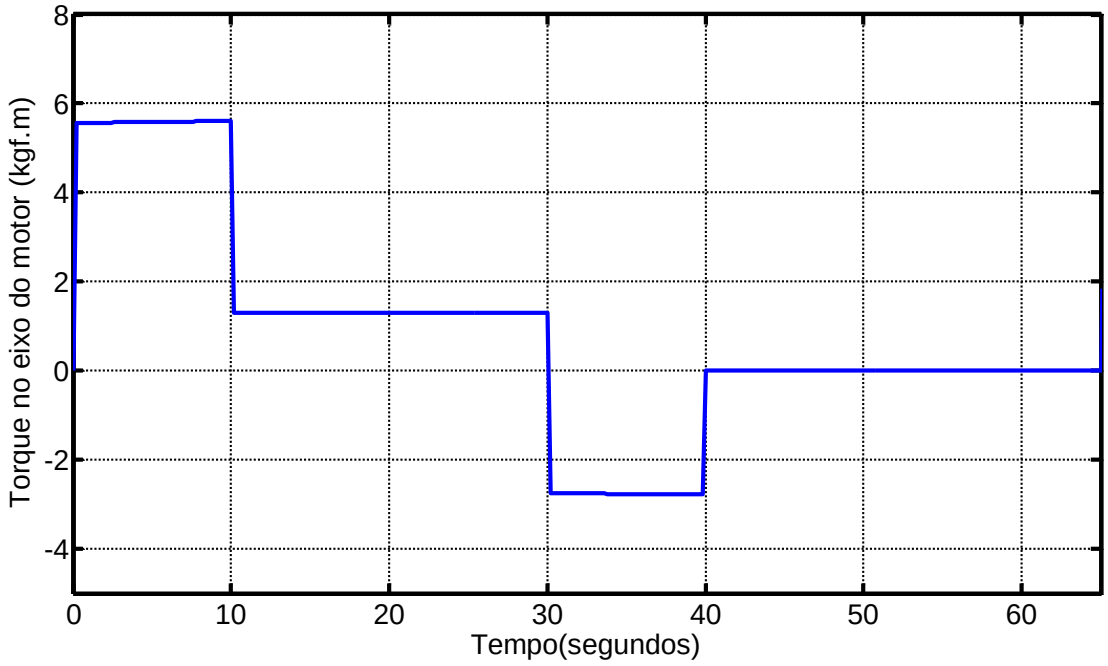
Da simulação com o código apresentado no APÊNDICE C, diversas informações podem ser obtidas, como a potência no eixo do motor, torque no eixo do motor e descarga da bateria, tal como mostrados nas figuras 14 a 16.

Figura 14 – Potência no eixo do motor em um ciclo



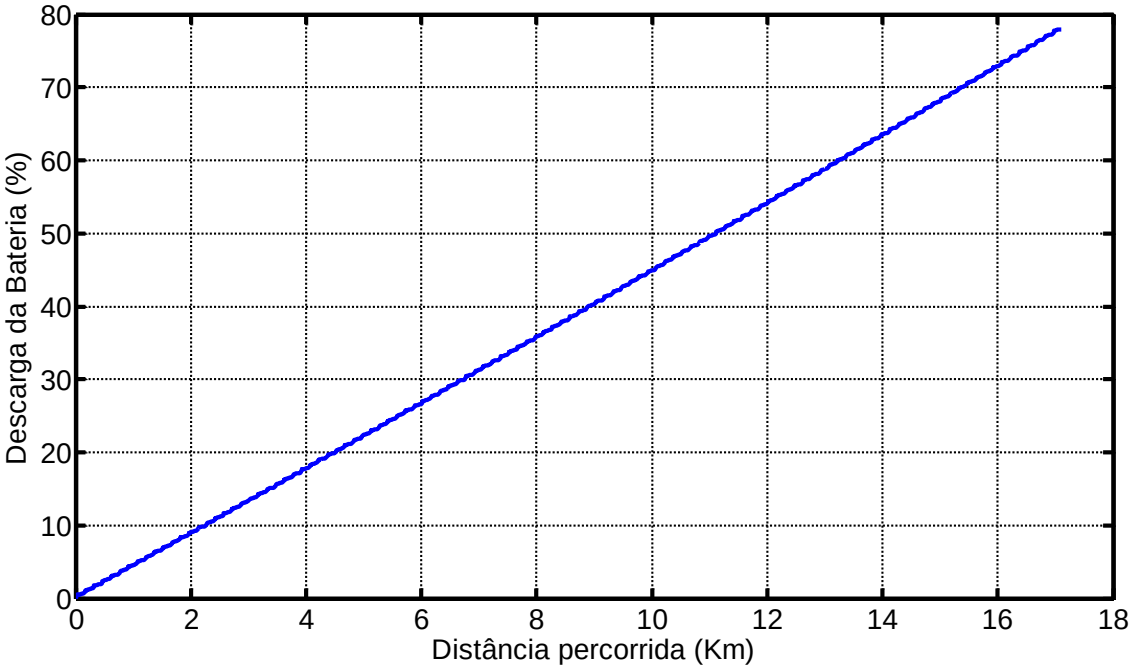
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 15 – Torque no eixo do motor em um ciclo



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 16 – Descarga da bateria em função da distância percorrida



Fonte: Produção do próprio autor.

Considerando-se o ciclo de trabalho apresentado na figura 11, as figuras 14 e 15 mostram que durante o período de aceleração o motor apresenta picos de potência e torque, operando em seguida sob condições mais leves. Observa-se ainda da figura 15 a possibilidade de regeneração de energia, durante a frenagem, para o banco de baterias, dado que a potência negativa no eixo do motor.

Nota-se da figura 16 que a utilização de 7 baterias é o suficiente para o ciclo de trabalho do veículo (descarga de aproximadamente 78% da bateria, o que representa uma autonomia de aproximadamente 22 km), porém isso resulta em uma tensão de bateria de 84 volts (abaixo dos 220 volts do motor). Como solução, é possível a utilização de um conversor CC/CC elevador (*Boost*) após a bateria, de um maior número de baterias ou de um motor projetado sob encomenda, para trabalhar a uma baixa tensão nominal.

A partir da figura 15 foi analisada a influência de cada uma das forças, apresentadas neste capítulo, na composição do torque do motor. Foram tomados como referência os instantes de tempo de 5 segundos, 20 segundos e 35 segundos, sendo os resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Contribuição das forças no torque do motor

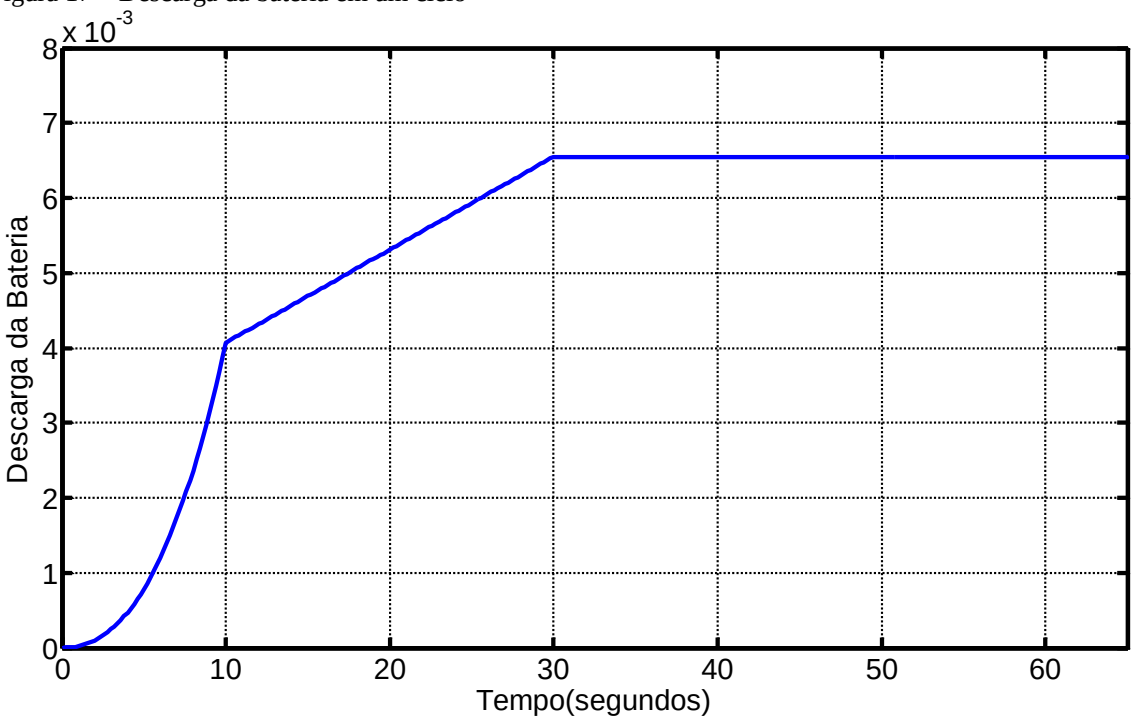
	5 segundos	20 segundos	35 segundos
Força de aceleração	77,5%	0%	77,5%
Força de resistência ao rolamento	22,3%	96,6%	22,3%
Força de arrasto aerodinâmico	0,2%	3,4%	0,2%

Fonte: Produção do próprio autor.

Na tabela 3 é possível observar que nos períodos de aceleração e desaceleração a maior influência no torque do motor se dá devido à força de aceleração. É possível observar também que para a situação em regime (força de aceleração nula) o torque no motor é composto primordialmente pela força de resistência ao rolamento.

É possível analisar também a influência do torque do motor no processo de descarga da bateria para um ciclo de trabalho, tal como mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Descarga da bateria em um ciclo



Fonte: Produção do próprio autor.

Nota-se na Figura 17 que no período de aceleração (torque motor elevado) a bateria se descarrega mais rapidamente do que quando comparada ao período de operação em regime

(torque motor reduzido). No período de desaceleração e repouso a bateria não se descarrega. Vale ressaltar que no script do APÊNDICE C não foi considerado o processo de recarga da bateria durante a frenagem.

Como dito anteriormente é possível observar nas figuras 14 e 15 que, embora o motor apresente picos de potência e de torque durante os 10 segundos de aceleração, o mesmo opera, logo em seguida, em regime sob condições mais leves. Dessa forma, para o dimensionamento do motor é possível fazer uso de sua capacidade de sobrecargas momentâneas, resultando assim em um motor de potência nominal menor do que o valor de pico observado na Figura 14.

Para o dimensionamento do motor, adotou-se o critério do torque rms, tal como mostrado na equação (12), em que o torque nominal do motor escolhido deve ser maior ou igual ao valor de torque rms (OHM,2006).

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{\sum {T_i}^2 * t_i}{\sum t_i}} \tag{12}$$

onde:

T_{rms}: torque rms do motor;
T_i: torque durante o i-ésimo segmento;
t_i: tempo de duração do i-ésimo segmento.

A equação (12) utilizada no código do APÊNDICE C foi aplicada ao perfil de torque apresentado na Figura 15 e obteve-se um valor de torque rms de 2,5431 kgf.m, o que equivale a um motor de indução, com quatro polos e 5,5 kW (7,5 HP) de potência (WEG, 2014). Observa-se ainda que no dimensionamento de um motor, além de atender ao critério do torque rms, é necessário que o conjugado máximo da carga não supere 80% do conjugado máximo do motor (JÚNIOR, 2005). Utilizando os dados fornecidos pelo fabricante, observa-se que o motor de 5,5 KW atende a todos os critérios de dimensionamento, tornando-se uma possibilidade para aplicação no veículo. Adota-se assim este motor como referência para esta aplicação, sendo seus principais dados apresentados a seguir (WEG):

- Potência nominal: 5,5 kW (7,5 HP)

- Torque nominal: 3,06 kgf.m
- Torque máximo: 9,79 kgf.m
- Rotação nominal: 1750 RPM
- Tensão nominal: 220 Volts

Apesar do critério de dimensionamento utilizado estar dentro das normas, é comum utilizar motores limitando seu torque máximo em duas vezes o valor do torque nominal. Fazendo essa limitação, e considerando agora o veículo realizando uma arrancada em um aclive de 6º (típico de uma rodovia) (SILVEIRA, 2007), considerando também um tempo de aceleração de 20 segundos (para não elevar muito a potência do motor), encontra-se a um motor de torque rms de 5,92 kgf.m o que pelos critérios de dimensionamento equivale ao uso de um motor de indução, com quatro polos e 15 kW (20 HP) de potência (WEG, 2014).

Por fim, foi realizada uma análise da máxima inclinação admissível para o veículo a partir de variações da carga e do valor da relação de transmissão do redutor. Embora o código apresentado no APÊNDICE C tenha considerado o veículo operando inicialmente em um terreno plano (dado ser esta, de forma geral, sua condição de trabalho na UFES), é interessante saber qual sua capacidade máxima de aclive. A capacidade máxima de aclive pode ser obtida conforme equação (13) (TANAKA, 2013):

$$sen(i) = \frac{F_t - F_{ad} - F_{rr}}{M * g} \tag{13}$$

onde:

F_t: força de tração nas rodas do veículo, em newtons;
F_{ad}: força de arrasto aerodinâmico, em newtons;
F_{rr}: força de resistência ao rolamento, em newtons;
M: massa do veículo, em quilogramas;
g: aceleração da gravidade, em metros por segundo ao quadrado.

A análise do aclive máximo do veículo foi realizada considerando-se três valores diferentes de carregamento (vazio, meia carga e carga máxima), bem como três valores diferentes de redutor, sendo que em todos os casos foi considerado que o motor elétrico opera com torque nominal em rotação nominal. A análise do aclive máximo foi realizada a partir do código em

MATLAB apresentado no APÊNDICE D, sendo que os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Capacidade de aclive dado variações de carga e de relação de transmissão – redutor

	Redutor 12:1 (18,14 km/h)	Redutor 22:1 (9,89 km/h)	Redutor 52:1 (4,19 km/h)
100% de carga	0,85º	2,89º	8,29º
50% de carga	1,48º	4,27º	11,71º
0% de carga	2,84º	7,28°	19,27

Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que operando na condição de marcha principal (redutor 12:1) o veículo apresenta uma capacidade máxima de aclive bem pequena. Porém, observa-se também que é possível fazer uso de marchas reduzidas, assim como é feito no veículo atualmente utilizado na UFES, para a obtenção de uma maior capacidade de aclive. O uso de uma marcha reduzida consiste em aumentar a relação de transmissão do redutor, limitando a velocidade máxima do veículo, porém, obtendo-se ganhos no valor do torque nas rodas e, consequentemente, na capacidade máxima de aclive. Observa-se na tabela 4, obviamente, que quanto mais leve estiver o veículo, maior será sua capacidade máxima de aclive.

Vale ressaltar que a utilização de um conjunto de 7 baterias chumbo-ácidas de 60 Ah e de um motor de indução de 5,5 kW resulta em um peso total de aproximadamente 250 kg. Estima-se que o motor diesel do veículo atual pesa em média 220 kg o que mostra que na prática o veículo elétrico será mais pesado que o veículo atual. Apesar disso, como o projeto foi sobredimensionado para a condição de carga esperada na coleta de lixo na UFES, não será necessário realizar nenhuma modificação no dimensionamento realizado.

6. SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

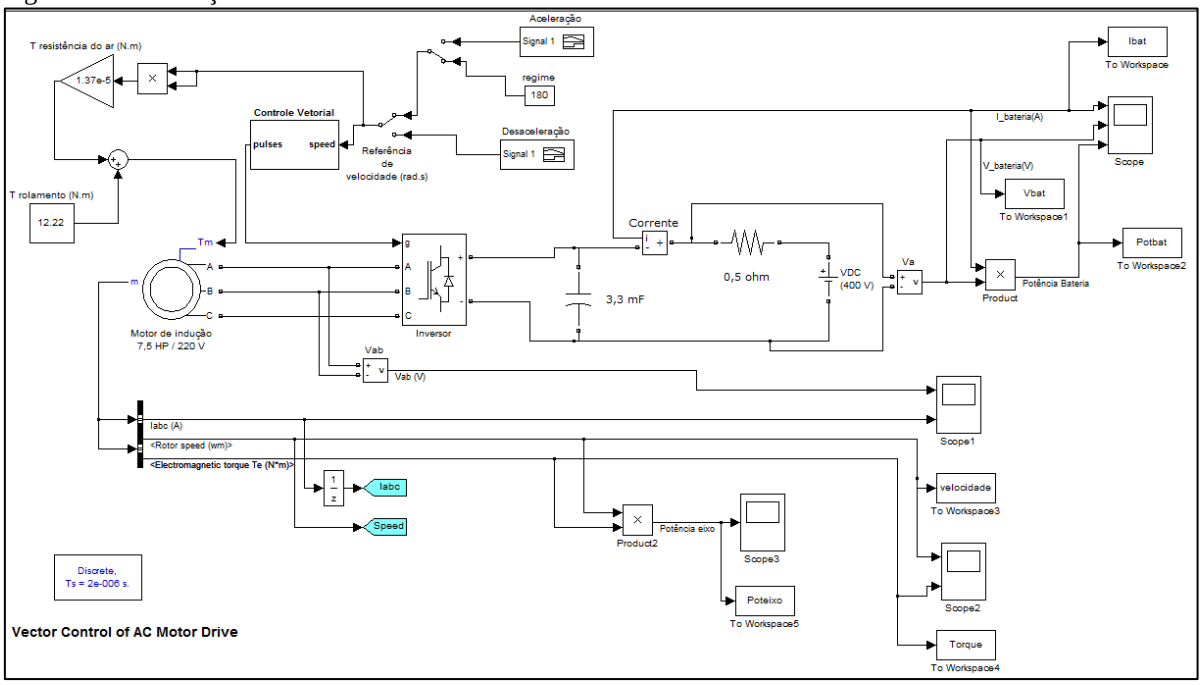
Este capítulo tem como objetivo verificar se as características de resposta do motor, obtidas no MATLAB, no capítulo anterior, são de fato possíveis de serem obtidas na prática. Além disso, será possível observar a influência do sistema de controle vetorial na resposta do motor, embora se ressalte que este trabalho não apresenta como objetivo realizar otimizações ou análises profundas acerca do sistema de controle.

O sistema de controle vetorial parte do princípio de que com o uso de um sistema microprocessado adequado é possível controlar o motor de indução de forma similar ao controle do motor CC com excitação independente. Este tipo de controle também é comumente chamado de controle desacoplado ou ortogonal, sendo também aplicado em motores síncronos (BOSE, 2002).

O sistema de controle vetorial surgiu por volta de 1970 e baseia-se no fato de que é possível, a partir de um sistema de mudança de variáveis, fazer com que as correntes do estator (sistema abc) que são variáveis no tempo, apresentem-se na forma de correntes contínuas (sistema $d^e - q^e$). O processo de mudança de variáveis do sistema abc para o sistema $d^e - q^e$ faz com que se obtenham duas correntes ortogonais e desacopladas, $i_{qs}\ e\ i_{ds}$, sendo a primeira responsável pelo controle do torque e a última responsável pelo controle do fluxo do motor (ARANTES, 2007). O controle vetorial apresenta a vantagem de ser um sistema rápido, preciso e que possibilita a obtenção de uma relação torque/corrente alta (BOSE, 2002).

O sistema de controle vetorial utilizado neste projeto de graduação foi obtido a partir da adaptação de um exemplo do software Simulink (obtido digitando-se power_acdrive na linha de comando do MATLAB) sendo o resultado mostrado na Figura 18.

Figura 18 – Simulação do sistema de controle



Fonte: Produção do próprio autor.

No modelo acima, a referência de velocidade (aceleração, regime e desaceleração) foi utilizada com base no ciclo de trabalho do veículo apresentado na Figura 11. O torque de carga foi utilizado considerando o torque de resistência ao rolamento e o torque de resistência do ar referidos ao eixo do motor. O motor de indução foi implementado considerando-se um motor de 7,5 HP, 220V, 4 polos e 60 Hertz, com uma inércia de 2,2 kg.m². Esta inércia já considera a inércia de carga referida ao eixo do motor e foi obtida considerando o princípio da conservação da energia conforme a equação (14):

$$\frac{1}{2} * M * v^2 = \frac{1}{2} * \mathrm{I} * w^2 \tag{14}$$

onde:

M: massa total do veículo, em quilogramas;

I: inércia no eixo do motor, em quilograma metro quadrado;

v: velocidade linear do veículo, em metros por segundo;

w: velocidade angular do motor, em radianos por segundo.

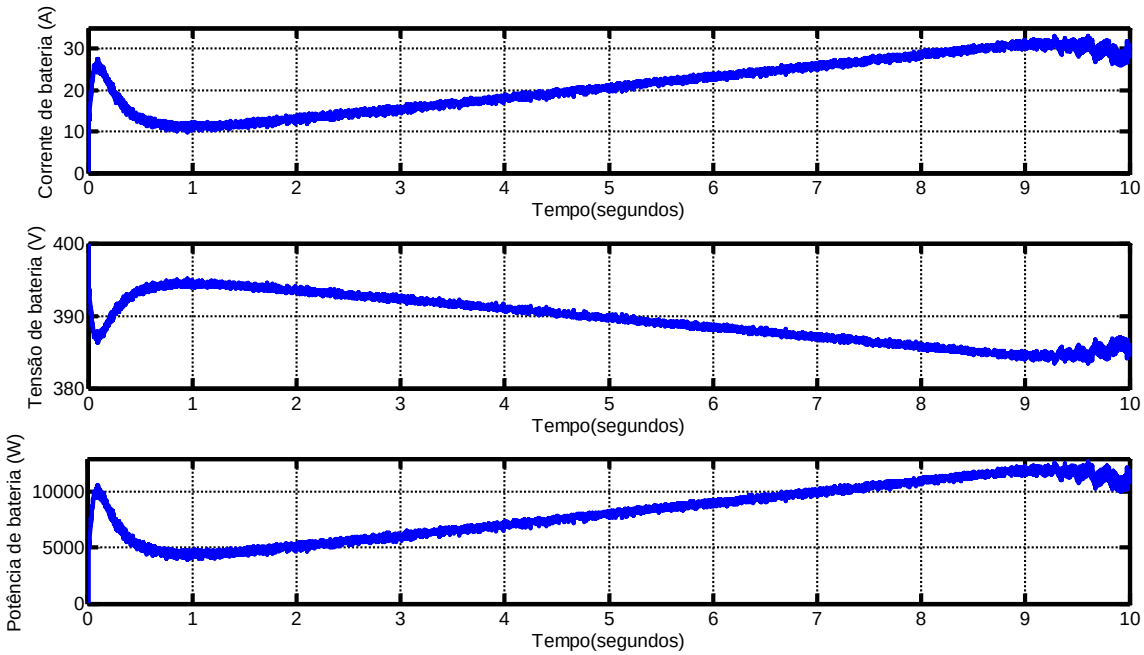
Os demais parâmetros do motor (resistência do rotor, indutância mútua entre fases, etc.) foram utilizados a partir do modo *preset*, disponível no bloco do motor, considerando-se um motor de 10 HP (dado a não disponibilidade de parâmetros para um motor de 7,5 HP).

Observa-se que o controle vetorial é dependente dos parâmetros do motor, sendo assim, foi necessário a atualização de variáveis dentro do bloco de controle vetorial. Observou-se também que a malha de corrente do sistema de controle era implementada por banda de histerese em que, para a obtenção de uma melhor resposta de torque, utilizou-se o valor de uma banda de 2 amperes.

A modelagem da bateria foi realizada considerando a utilização de um banco de 400 volts a fim de se obter uma tensão de 220 volts na saída do inversor. Novamente ressalta-se que a utilização de um grande banco de baterias em conjunto com um motor de 220 volts não é a única solução para este problema, sendo escolhida apenas por simplicidade de simulação. A bateria foi modelada utilizando-se uma fonte CC constante, tendo em vista que para simulações de poucos segundos, como as que serão realizadas neste projeto, não será analisada a dinâmica de descarga do banco. A bateria foi modelada considerando-se uma resistência interna de 0,5 ohm em conjunto com um capacitor de 3,3 mili faradays com a finalidade de filtragem.

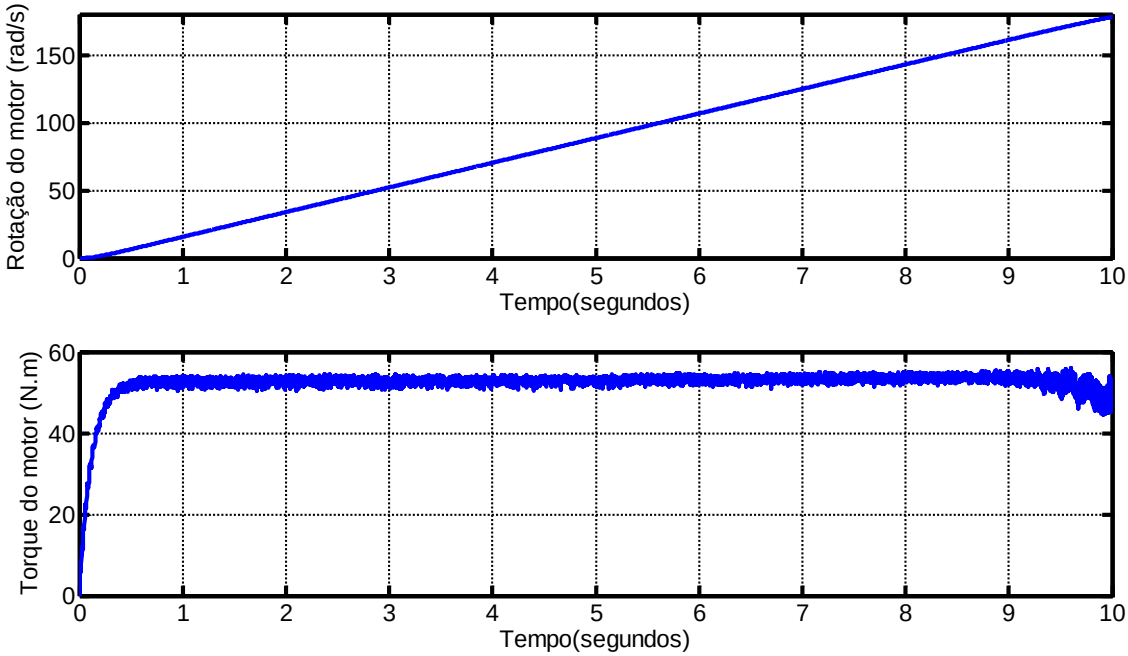
A simulação foi realizada inicialmente considerando-se o motor partindo do repouso e atingindo a velocidade de 180 rad/s em 10 segundos, sendo que os resultados obtidos podem ser visualizados nas figuras 19 e 20.

Figura 19 – Corrente, tensão e potência de bateria para o período de aceleração do veículo



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 20 – Rotação e torque do motor para o período de aceleração do veículo



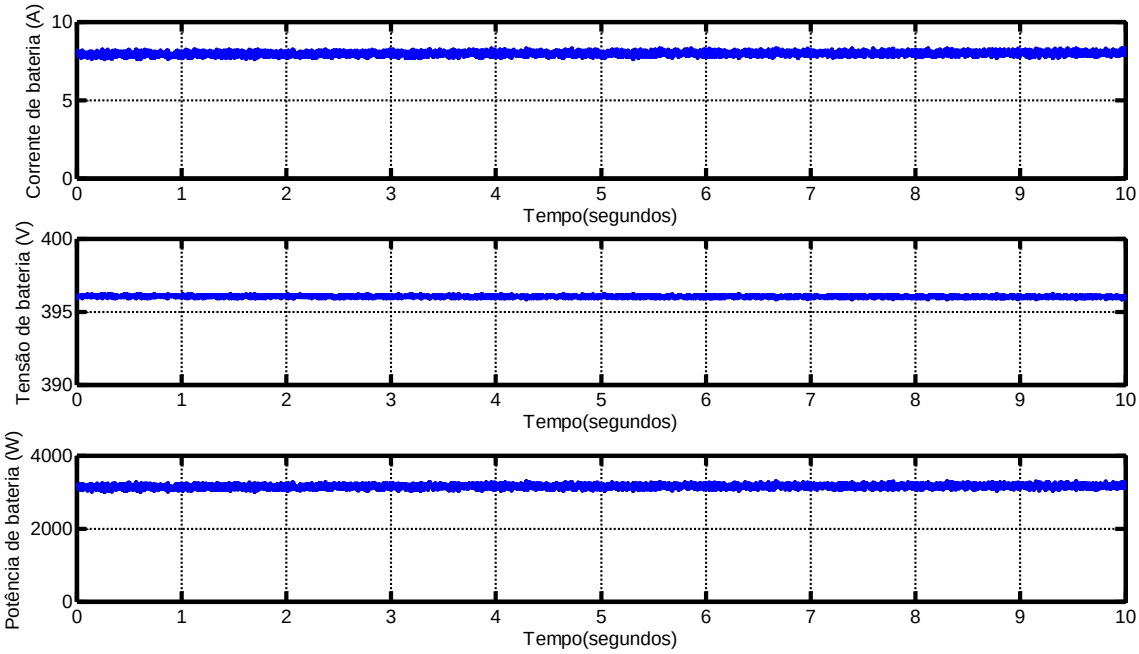
Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se na Figura 19 que a bateria apresentou um fluxo de potência positivo, indicando que o veículo opera sob condição motora. Dessa forma, é possível observar que temos uma corrente de bateria positiva e crescente, com consequente queda da tensão terminal do banco. Na figura 20, observa-se que o motor seguiu a rampa de referência e que o torque eletromagnético desenvolvido ficou próximo aos 55 N.m (5,61 kgf.m) que eram esperados a partir da simulação em MATLAB apresentada na Figura 15.

Como forma de comprovação e quantificação da energia consumida/fornecida pelo motor, foi utilizado o script em MATLAB, que pode ser visualizado no ANEXO A (CAMILO, 2014), em que se obteve como resultado o valor de energia de 13 Wh para o intervalo de aceleração. Como base de comparação, a energia obtida calculando-se a área abaixo da curva de potência, apresentada na Figura 14, nos 10 segundos de aceleração, resulta em um valor de energia de 13,9 Wh, o que comprova que a simulação em MATLAB e em Simulink apresentaram resultados compatíveis para o intervalo de aceleração.

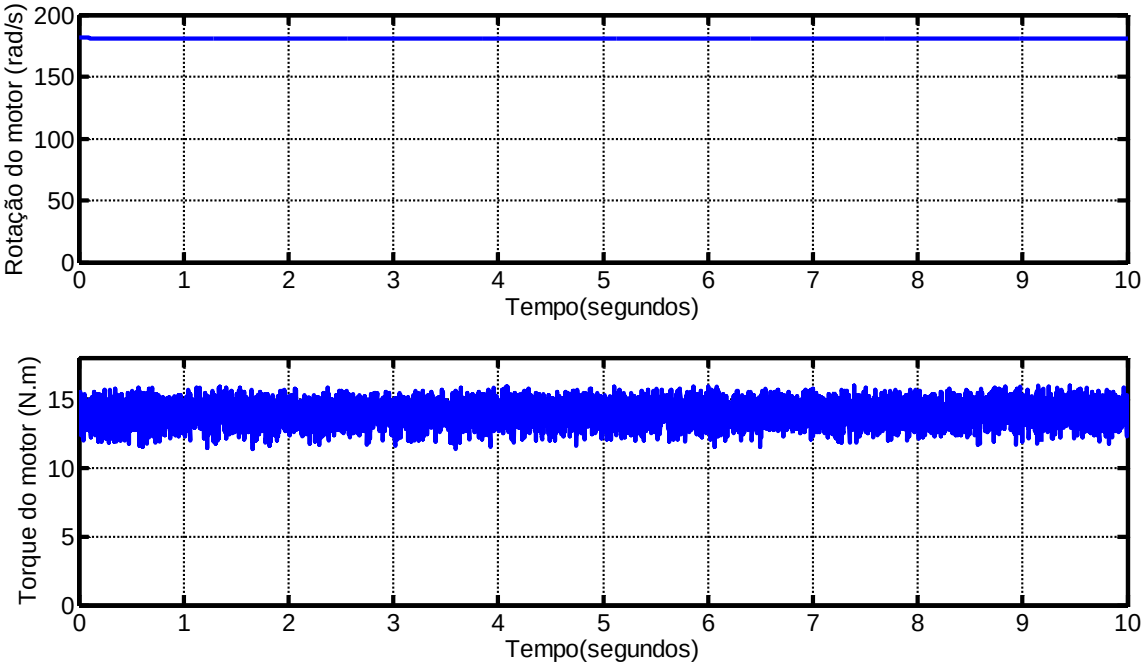
Em seguida, foi realizada a simulação da operação em regime, em que, por simplicidade, foi considerado um intervalo de apenas 10 segundos. Os resultados da simulação são apresentados nas figuras 21 e 22.

Figura 21 – Corrente, tensão e potência de bateria para o período em regime do veículo



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 22 – Rotação e torque do motor para o período em regime do veículo



Fonte: Produção do próprio autor.

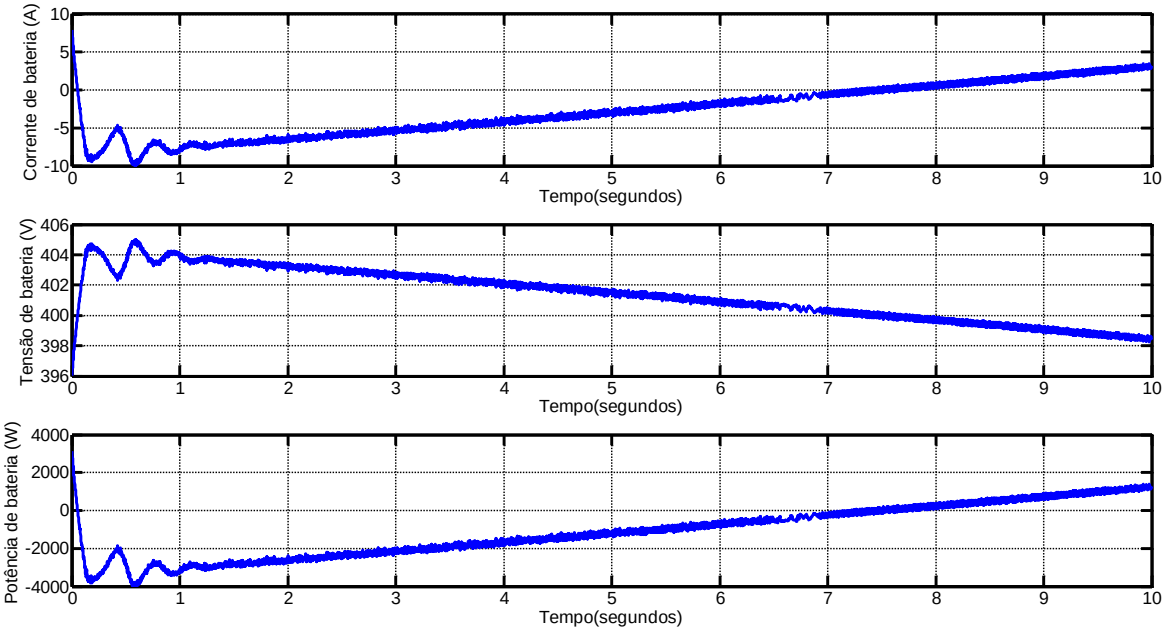
Na Figura 21, a bateria apresentou um fluxo de potência positivo, indicando novamente que o veículo opera sob condição motora. Observa-se que temos uma corrente de bateria positiva e constante, com consequente queda da tensão terminal do banco. Na Figura 22, o motor operou sob velocidade constante e o torque eletromagnético desenvolvido ficou próximo aos 12,65

N.m (1,29 kgf.m) que eram esperados a partir da simulação em MATLAB apresentada na Figura 15.

Mais uma vez foi utilizado o script do ANEXO A (CAMILO, 2014) para verificação da energia consumida pelo motor e obteve-se como resultado o valor de 7,1 Wh. Considerando 10 segundos em regime na curva de potência da Figura 14, encontra-se uma energia de 6,4 Wh, comprovando mais uma vez que a simulação em MATLAB e em Simulink foram coerentes.

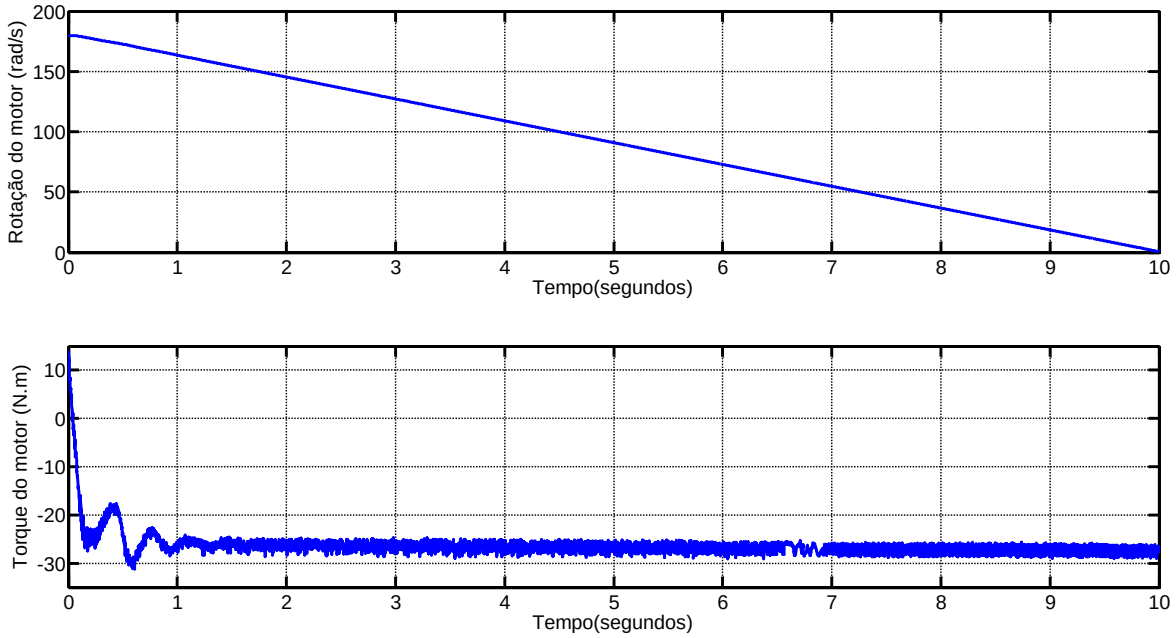
Por fim, foi realizada a simulação para o intervalo de desaceleração do veículo, conforme resultados das figuras 23 e 24.

Figura 23 – Corrente, tensão e potência de bateria para o período de desaceleração do veículo



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 24 – Rotação e torque do motor para o período de desaceleração do veículo



Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se na figura 23 que, desta vez, a bateria apresentou um fluxo de potência negativo, indicando que o veículo opera agora sob condição geradora e a corrente de bateria negativa acarreta um aumento da tensão do banco. Na figura 24, o motor seguiu a rampa de desaceleração e desenvolveu torque negativo próximo aos -27 N.m (-2,75 kgf.m) que eram esperados a partir da simulação em MATLAB apresentada na Figura 15.

A verificação da energia do motor resultou em -6,5 Wh pelo Simulink e -6,64 Wh pelo MATLAB, comprovando a possibilidade de frenagem regenerativa do veículo e que, mais uma vez, as simulações foram compatíveis.

Na Tabela 5 é possível observar um comparativo entre os resultados de energia obtidos via MATLAB e via Simulink.

Tabela 5 – Comparativo entre as simulações em MATLAB e Simulink

	Energia obtida via MATLAB (Wh)	Energia obtida via Simulink (Wh)	Erro (%)
Aceleração	13,9	13	6,5
Regime	6,4	7,1	11
Frenagem	-6,64	-6,5	2,11

Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se da simulação em Simulink que, em um dia de operação, considerando um rendimento médio de 88% do motor, o veículo elétrico consome aproximadamente 3,52 kWh (desconsiderando o processo de recarga da bateria durante a frenagem). Utilizando como aproximação o fato de que um banco de 7 baterias de 60 Ah de capacidade apresenta uma energia armazenada de 5 kWh, verifica-se que é possível sua utilização, sem recarga, durante um dia de operação do veículo.

É possível realizar uma análise simplificada do consumo energético do veículo, em um dia de operação, além de um comparativo entre o custo energético do veículo elétrico e o veículo diesel atualmente utilizado. Tomando como base o custo de 0,29884 R$/kWh (ANEEL, 2014) observa-se que o veículo elétrico apresenta um custo energético diário de aproximadamente R$ 1,00.

Como comparação, adota-se que o veículo atualmente utilizado apresenta um consumo de 1 litro de diesel por hora trabalhada (AGRALE, 2007), o que representa um consumo de 2,48 litros de diesel em um dia de operação. Sabendo que o litro de diesel no Espírito Santo custa em média R$ 2,48 (ANP, 2014), calcula-se que o veículo atualmente utilizado apresenta um custo diário de aproximadamente R$ 6,00.

Vale ressaltar que a análise do custo de operação, aqui realizada, não é suficiente para indicar viabilidade econômica do uso do veículo elétrico, sendo que para tal um estudo mais aprofundado torna-se necessário. Na Tabela 6 é possível visualizar um resumo da análise energética realizada.

Tabela 6 – Análise energética dos veículos

Consumo energético diário do veículo elétrico (kWh/dia)	3,52
Consumo de diesel diário do veículo atualmente utilizado (L/dia)	2,48
Custo energético diário do veículo elétrico (R$/dia)	1,00
Custo energético diário do veículo atualmente utilizado (R$/dia)	6,00

Fonte: Produção do próprio autor

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi possível observar como realizar projeto e simulação, simplificados, de um veículo totalmente elétrico. Apesar da simplificação do projeto, o uso de ferramentas computacionais adequadas permite obter uma boa estimativa acerca do desempenho do veículo. Foi possível observar que diversas são as tecnologias disponíveis para serem utilizadas em um veículo elétrico, sendo que sua escolha depende em grande parte da decisão do projetista. Os resultados obtidos no MATLAB e no Simulink mostraram-se compatíveis, comprovando a coerência dos modelos adotados.

Considerando os resultados obtidos neste projeto de graduação, sugere-se como trabalho futuro a construção de um veículo elétrico protótipo para análises e testes de desempenho, frente ao ciclo de coleta de lixo da UFES. Outra sugestão é acerca de uma análise da viabilidade econômica de se realizar a troca do atual veículo utilizado na coleta de lixo na UFES por um veículo elétrico, pois, embora não seja esse o objetivo principal do projeto, caso exista viabilidade econômica, a construção de um veículo protótipo torna-se ainda mais interessante. Por fim, sugere-se um estudo mais aprofundado sobre novos modelos de simulação que considerem de forma mais precisa a dinâmica do veículo em geral.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRALE. **Agrale imprensa:** Agrale expõe sua linha de tratores na Coopavel 2007. Caxias do Sul, 2007. Disponível em: <http://www.agrale.com.br/pt/imprensa/noticias/detalhes/153/agrale-expoe-suas-linhas-de-tratores-na-coopavel-2007#.U8hfkfldVvA>. Acesso em: 17 jul. 2014.

AGRALE. **Trator 4230.4 Cargo**. Caxias do Sul: Agrale, 2014. 2p. Informativo. Disponível em: <http://www.agrale.com.br/pdf/pt/tratores_4000_trator_agrale_42304_cargo.pdf>. Acesso em: 6 jan. 2014.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Conheça as Tarifas da Classe de Consumo Residencial de uma Concessionária**. Brasília, 2014. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/tarifaAplicada/index.cfm>. Acesso em: 17 jul. 2014.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Síntese dos Preços Praticados - Sudeste:** Resumo I - Diesel R$/l. Período: 06/07/2014 a 12/07/2014. Brasília, 2014. Disponível em: < http://www.anp.gov.br/preco/>. Acesso em: 17 jul. 2014.

AMARANTE, O. A. C.; SILVA, F. J. L.; ANDRADE, P. E. P. A. **Atlas Eólico:** Espírito Santo. Vitória: Aspe, 2009. Disponível em: <http://www.forumdeenergia.com.br/nukleo/pub/atlas_eolico_es.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2014.

ARANTES, I. L. **Implementação de Controle Vetorial de Motor de Indução Trifásico por Imposição de Correntes.** 2007. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Unifei, Itajubá. Disponível em: <http://juno.unifei.edu.br/bim/0030882.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2014.

BALDISSERA, L. B. **Desenvolvimento de um protótipo de um veículo elétrico**. 2012. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí. Disponível em: <http://www.abve.org.br/downloads/TCC-Luciano-Bonato.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2014.

BARRETO, G**. Veículo elétrico à bateria**: contribuições à analise de seu desempenho e seu projeto. 1986. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000044749>. Acesso em: 6 jan. 2014.

BORBA, J. L. **Mecânica de Locomotivas**. Apostila. Belo Horizonte: IEC PUC Minas, 2011.

BOSE, B. K. **Modern Power Eletronics and AC Drives**. New Jersey: Prentice-Hall, 2002.

CAMILO, B. C. T. **Projeto básico de técnica de recuperação de energia em frenagens regenerativas de elevadores.** 2014. 51f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

CHAU, K.T.; WANG, Z. **Overview of power electronic drives for electric vehicles**. HAIT Journal of Science and Engineering B. Hong Kong: Holon Academic Institute of Technology, 2005. vol. 2, cap. 4, p. 737-761. Disponível em: <http://www.magniel.com/jse/B/vol0236B/jse12.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2014.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2013** – Ano base 2012: Relatório Síntese. Rio de Janeiro, 2013. 55 p.

HUSAIN, I. **Electric and Hybrid Vehicles**: Design Fundamentals. Florida: CRC Press, 2005.

JÚNIOR, N. A. Motores trifásicos de indução: Dimensionamento. **Integração**, São Paulo, ano XI, n. 42, p. 243-250, jul./ago./set. 2005. Disponível em: <ftp://ftp.usjt.br/pub/revint/243_42.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2014.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. **Electric vehicle technology explained**. Chichester: Jhon Wiley & Sons, 2003. Disponível em: <http://ev-bg.com/wordpress1/wp-content/uploads/2011/08/electric-vehicle-technology-explained-2003-j-larminie.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2014.

NOCE, T. **Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em:

<http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/EngMecanica_NoceT_1.pdf>. Acesso em: 6 jan. 2014.

OECD; IEA.**Global EV Outlook:** Understanding the Electric Vehicle Landscape to 2020. Paris, Abr. 2013. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,37024,en.html>. Acesso em: 7 jan. 2014.

OHM, D. Y. **Selection of servo motors and drives.** [S.l.], Drivetech, Inc, Feb. 2006. Disponível em: <http://www.drivetechinc.com/articles/pm96sizrev2.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2014.

PEREIRA, A. **Sistema de tração de um ônibus elétrico híbrido com pilhas a combustível e baterias.** 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2007062902.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2014.

SILVEIRA, F. L. S. Inclinações das ruas e das estradas. **Física na escola**, São Paulo, vol. 8, n. 2, p. 16-18, 2007. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~lang/Textos/Ruas_estradas.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2014.

TANAKA, C. N. **Metodologia de dimensionamento do sistema de tração para veículos elétricos**. 2013. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

UPG. **Sealed lead-acid battery**. Texas: UPG, 2014. 2 p. Disponível em: <http://www.mrsolar.com/pdf/universal_battery/UB30H.pdf>. Acesso em: 5 mai. 2014.

WEG. **W22:** Motor Elétrico Trifásico. Rev. 20. Jaraguá do Sul: WEG, 2014. 46 p. Catálogo Técnico Mercado Brasileiro. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w22-motor-trifasico-tecnico-mercado-brasil-50023622-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em: 5 mai. 2014.

APÊNDICE A – Script do MATLAB para simulação do ciclo de trabalho de veículo

```
V=zeros (1,37051);  %vetor para armazenar as velocidades durante o ciclo de trabalho (velocidades em m/s)
primeiro=0; % ponteiro para ser utilizado no loop de geração do ciclo de trabalho
dist=0; %acumulador da distância percorrida em Km
delta=0.2; %período de amostragem

for repeticao=1:114  %número de repetições do ciclo ( 114 repetições = um dia de trabalho)
for n=primeiro+2:primeiro+51
   V(n)=V(n-1)+(0.5*delta); % veículo acelera de 0 até 18 km/h em 10 segundos
   dist=dist+((V(n)*delta)/1000); %contabilização da distância percorrida
end
for n=primeiro+52:primeiro+151
   V(n)=V(n-1); %veículo mantem a velocidade de 18 km/h por 20 segundos
   dist=dist+((V(n)*delta)/1000); %contabilização da distância percorrida

end
for n=primeiro+152:primeiro+201
   V(n)=V(n-1)-(0.5*delta); %veículo desacelera de 18 km/h até 0 em 10 segundos
   if V(n)<0
      V(n)=0;    % condição para garantir que a velocidade do motor será zero
   end
   dist=dist+((V(n)*delta)/1000); %contabilização da distância percorrida

end
for n=primeiro+202:primeiro+326
   V(n)=0; %veículo fica parado por 25 segundos

 end
  primeiro=primeiro+325; %ponteiro posicionado na penúltima posição de V que foi escrita
end
```

APÊNDICE B – Script do MATLAB para cálculo da tensão de circuito aberto da bateria

```
function E=tensao_circuito_aberto(descarga,celulas)
if descarga<0
descarga=0;
end
if descarga > 1
descarga=1;
end
E = (2.15 - ((2.15-2.00)*descarga)) * celulas;
end
```

APÊNDICE C – Script do MATLAB para projeto e simulação do veículo elétrico

```
%-----declaração das variaveis-----------------------------------------%
%-------veículo-------
massa=2871; %massa total do veículo em kg (considerando carga + massa do veículo)
area=1;   %area frontal em m^2
cd=0.7;     %coeficiente de arrasto
p=1.2; %densidade do ar em kg/m3
mrr=0.015; %coeficiente de resistencia ao rolamento dos pneus
g=9.8; %aceleração da gravidade em m/s^2
G=12; %redutor de velocidade
r=0.33; %raio do pneu em m
rend_motor=0.88; %rendimento do motor
rend_transmissao=0.95; %rendimento da transmissao
%-------bateria------------
celulas=42; %número de células da bateria (7 baterias de 6 células)
capacidade=93; %capacidade da bateria em Ah para um tempo de descarga de 10h (60 Ah
para 1h de descarga)
k = 1.28; %coeficiente de Peukert
Capacidade_Peukert= ((capacidade/10)^k)*10; % Constante dada por I^k*T
Rin=(0.222/capacidade)*celulas; %resistencia interna da bateria em ohms
%-----------------------------------------------------------------------%

descarga=zeros (1,37051); %vetor para armazenar a profundidade de descarga da bateria.
0=carregada e 1=descarregada
Distancia=zeros (1, 37051); %vetor para armazenar a distancia percorrida.
carga_removida=zeros (1, 37051); %vetor para armazenar a carga removida da bateria
carga_fornecida=zeros (1, 37051); %vetor para armazenar a carga nominal fornecida pela
bateria

ciclo; %chamada da função para gerar o perfil de trabalho. Apêndice A
N=length(V); %tamanho do vetor de velocidades

Frr=mrr*massa*g; %força de resistencia ao rolamento (Constante)
Fra=0; %força de resistência ao aclive considerada nula (terreno plano)

E(1)=tensao_circuito_aberto(descarga(1),celulas);

for n=2:N

   Distancia(n)= Distancia(n-1)+((V(n)*0.2)/1000); %vetor de armazenamento da distância
   a(n)=(V(n)-V(n-1))/0.2; %obter os valores de aceleração durante o ciclo
   Fad(n)=0.5*area*p*V(n)^2; % Força de resistência do ar
   Fac(n)=massa*1.02*a(n); %Força de aceleração. Massa aumentada em 5% para
desconsiderar o efeito do momento de inércia
Ft(n)=Frr+Fad(n)+Fra+Fac(n); %Força de tração na roda
   Pt(n)=(Frr+Fad(n)+Fra+Fac(n))*V(n); %potência de tração necessária na roda
   w(n)=G*(V(n)/r); % velocidade angular do motor em rad/s
```

```
   if w(n)==0 % veículo parado
      Pm_entrada(n)=0;
      Pm_saida(n)=0;
      T(n)=0;
         else %veículo em movimento
      if Pt(n)>0 % veículo acelerando
         Pm_saida(n)=Pt(n)/rend_transmissao;
         T(n)=Pm_saida(n)/w(n);
         Pm_entrada(n)=Pm_saida(n)/rend_motor;
      else %veículo desacelerando
         Pm_saida(n)=Pt(n)*rend_transmissao; %Potência do motor é diminuida caso esteja
desacelerando. Ineficiência do motor ajuda a desacelerar
          T(n)=Pm_saida(n)/w(n);
         Pm_entrada(n)=Pm_saida(n)*rend_motor;
      end
   end

    E(n)=tensao_circuito_aberto(descarga(n-1),celulas); % Chamada da função para obtenção
da tensão de bateria

    if Pm_entrada(n)>0 % veículo drenando energia da bateria
       I(n) = (E(n) - sqrt(E(n)^2-4*Rin*Pm_entrada(n)))/(2*Rin);
       carga_removida(n) = carga_removida(n-1) +((I(n)^k)*0.2/3600);
       carga_fornecida(n)= carga_fornecida(n-1)+(I(n)*0.2/3600);
    else % veículo devolvendo energia para a bateria
       I(n)=0; %frenagem regenerativa foi considerada 0
       carga_removida(n) = carga_removida(n-1) +((I(n)^k)*0.2/3600);
       carga_fornecida(n)= carga_fornecida(n-1)+(I(n)*0.2/3600);
    end

    descarga(n) = carga_removida(n)/Capacidade_Peukert ;
    tensao(n)=E(n)-I(n)*Rin; % tensão terminal da bateria em volts

   if descarga(n)>1
      descarga(n)=1;
      tensao(n)=0;
    end
end

somatorio_torque=0;
for n=1: 326  % repetição de um ciclo

   somatorio_torque= somatorio_torque+((T(n)^2)*0.2);

end

Trms=sqrt(somatorio_torque/65)/9.8; % torque nominal do motor em Kgf.m
```

APÊNDICE D – Script do MATLAB para análise do aclive máximo do veículo

```
%-----declaração das variaveis-------------------------------------------%
massa=1325; %massa total do veículo em Kg (considerando carga + massa do veículo)
area=1;   %area frontal em m^2
cd=0.7;     %coeficiente de arrasto
p=1.2; %densidade do ar em Kg/m3 ao nível do mar
mrr=0.015; %coeficiente de resistencia ao rolamento dos pneus - Tanaka
g=9.8; %aceleração da gravidade em m/s^2
G=51; %redutor (rotação de entrada/rotação de saída)
r=0.33; %raio do pneu em m
T=30; %torque nominal do motor em N.m
W=183.259; %Rotação nominal do motor em rad/s
rend_transmissao=0.95; %rendimento da transmissao
%-----------------------------------------------------------------------%

Troda=T*G*rend_transmissao;  % Toque aplicado na roda em N.m
Froda=Troda/r; % Força aplicada na roda em N
V=(W/G)*r*3.6; % Velocidade linear da roda em Km/h

Fad=0.5*area*p*V^2; % Força de arrasto dinâmico
Frr=mrr*massa*g; %força de resistencia ao rolamento

sen_Alfa_max=(Froda-Fad-Frr)/(massa*g); %seno da máxima inclinação

alfa=asind(sen_Alfa_max); % máxima inclinação, em graus, alcançada pelo veículo
```

ANEXO A – Script do MATLAB para calcular a energia consumida pelo motor

```
% Cálculo da energia utilizando o Método dos Trapézios

% Parâmetros:
% potencia - vetor das potências instantâneas
% t - vetor dos instantes de tempo

function kWh = energia(potencia, t)

dim = size(t);
dimensao = dim(1)-1;
area = 0;

for i=1:dimensao

h = t(i+1) - t(i); % altura
B = potencia(i+1); % base maior
b = potencia(i); % base menor

A = (((B+b) / 1000) * (h/3600)) / 2; % area
area = area + A; % area acumulada

end

kWh = area; % energia consumida em kWh

end
```