

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
NÍVEL MESTRADO PROFISSIONAL

CLAUDINILSON ALVES LUCZKIEWICZ

ESTUDO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS
POPULARES

São Leopoldo

2017

CLAUDINILSON ALVES LUCZKIEWICZ

ESTUDO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS
POPULARES

Dissertação apresentada à Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. César David Paredes Crovato

São Leopoldo

2017

Claudinilson Alves Luczkiewicz

ESTUDO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS
POPULARES

Dissertação apresentada à Universidade do
Vale do Rio dos Sinos – Unisinos, como
requisito parcial para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica

Aprovado em 10 de janeiro de 2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander – UNISINOS

Prof. Dr. Rodrigo Ivan Goytia Mejía – UNISINOS

Prof. Dr. César David Paredes Crovato – orientador – UNISINOS

Visto e permitida a impressão

São Leopoldo

Prof. Dr. Eduardo Luis Rhod
Coordenador PPG em Engenharia Elétrica

Dedico este trabalho a Romano e Alveny, meus
pais queridos, a Dulciane, minha irmã, e à vida,
pelas oportunidades.

(Mãe, saudades eternas!)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, pela vida.

Ao meu professor orientador, César David Paredes Crovato, por sua paciência e dedicação na condução deste trabalho.

A todos os professores do curso de pós-graduação profissional em Engenharia Elétrica da UNISINOS, por seus ensinamentos.

Aos colegas da turma 2015/1, pelo incentivo, encorajamento e apoio.

A TECNOSINOS, pelo apoio

RESUMO

Esta pesquisa objetiva explorar a alternativa de propulsão automotiva elétrica e apresentar uma proposta de utilização de equipamentos industriais produzidos em larga escala que possam ser inseridos no subsistema de propulsão de um veículo elétrico com características populares, para, dessa forma, oferecer uma alternativa de rápida inserção dos veículos em centros urbanos. As características de potência e torque da alternativa proposta foram investigadas através da dinâmica longitudinal veicular e dos equipamentos existentes comercializados. São avaliadas três configurações de propulsão, sendo um propulsor elétrico conectado de forma única, com dois propulsores independentes conectados nas rodas traseiras e com quatro propulsores independentes conectados diretamente nas rodas. Foram avaliados também aspectos econômicos, podendo em certos casos apresentar custos atrativos ao consumidor final. Os principais resultados, de acordo com as características técnicas dos equipamentos, a viabilidade econômica e o peso, demonstram que a potência mínima necessária para o desempenho do subsistema de tração deve ser de 33,70 kW com o consumo de energia de 19,10 kWh, estando distribuído na configuração com dois propulsores independentes conectados nas rodas traseiras.

Palavras-chave: Propulsão Alternativa. Veículos Elétricos Populares. Equipamentos Industriais em Veículos Elétricos.

ABSTRACT

The objective of this study is to explore the alternative of electric automotive propulsion and present a proposal for the use of industrial equipment ever produced on a large scale that can be inserted to the propulsion subsystem of an electric vehicle with popular features, and thus offer an alternative fast integration of vehicles in urban centers. The power and torque characteristics of the alternative proposal were investigated for longitudinal vehicle dynamics and its equipment sold. Three driving settings are evaluated, and an electric thruster connected in a unique way, with two independent propellers connected to the rear wheels and four independent drivers directly connected to the wheels. It is also observed the characteristic of economic viability may present attractive costs to the final consumer. The main results, according to the technical characteristics of the equipment, economic viability and weight, show that the minimum power required for the performance of the traction subsystem should be 33.70 kW with energy consumption of 19.10 kWh and distributed in the configuration with two independent propellers connected to the rear wheels.

Keywords: Alternative propulsion. Popular Electric Vehicles. Industrial equipment for Electric Vehicles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Poluição atmosférica na cidade do Rio de Janeiro.....	17
Figura 2 – Referência dos eixos de coordenada	24
Figura 3 – Forças atuantes no veículo em rampa	27
Figura 4 – Ábaco de inclinação de pista.....	28
Figura 5 – Teste de aerodinâmica em túnel de vento	29
Figura 6 – Configuração do trem de força para sistema convencional	33
Figura 7 – Configuração em série de veículo elétrico híbrido	34
Figura 8 – Configuração em paralelo de veículo elétrico híbrido	35
Figura 9 – Configuração em <i>split</i> de veículo elétrico híbrido	35
Figura 10 – Processo de reação de célula de combustível.....	37
Figura 11 – Electrobat (1894).....	38
Figura 12 – Fiat Palio Weekend Elétrico	39
Figura 13 – Fiat FCC II	40
Figura 14 – Renault Twizy	40
Figura 15 – Configuração dos subsistemas do trem de força em veículos elétricos	41
Figura 16 – Configuração do sistema de trem de força para veículos elétricos	42
Figura 17 – Caracterização do enrolamento trifásico em motores assíncronos	44
Figura 18 – Forças magnetomotriz resultantes.....	46
Figura 19 – Rotor tipo gaiola.....	47
Figura 20 – Motor de indução trifásico	49
Figura 21 – Curva característica conjugado \times rotação.....	50
Figura 22 – Características das curvas de conjugado das diferentes categorias.....	51
Figura 23 – Elementos da bateria chumbo-ácido	54
Figura 24 – Diagrama de inversor de frequência	56
Figura 25 – Controle de velocidade por sinal PWM	58
Figura 26 – Encoder de posição de deslocamento.....	58
Figura 27 – Domínios de métodos axiomáticos	60
Figura 28 – Hierarquia no processo axiomático.....	61
Figura 29 – Conceito de <i>zig zag</i> no processo axiomático	62
Figura 30 – Distribuição do fluxo de energia para propulsão	78
Figura 31. Modelo de interação entre os domínios	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Evolução nas fases do PROCONVE	23
Quadro 2 – Coeficiente de atrito de rolamento.....	26
Quadro 3 – Constantes de equivalências pelas respectivas unidades.....	47
Quadro 4 – Domínios da abordagem axiomática e diferentes projetos.....	60
Quadro 5 – Parâmetros comum de pesquisa.....	65
Quadro 6 – Obras de fundamentação para o trabalho	72
Quadro 7 – Parâmetros para o veículo.....	76
Quadro 8 – Dimensionamento das forças resistivas.....	77
Quadro 9 – Quadro morfológico para possíveis soluções	79
Quadro 10 Matriz de interações.....	80
Quadro 11 – Requisitos de projeto/comercial dos motores de propulsão	83
Quadro 12 – Equacionamento para o dimensionamento do motor elétrico	84
Quadro 13 – Parâmetros dos motores para propulsão	85
Quadro 14 – Parâmetros por fabricantes de motores de 6 polos	86
Quadro 15 – Equacionamento para o dimensionamento da fonte	88
Quadro 16 – Configurações de tecnologias para fonte de energia	89
Quadro 17 – Critérios para dimensionamento do controlador/inversor	89
Quadro 18 – Dimensionamento para o inversor de frequência	90

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1 – Árvore de requisitos para o projeto	81
Fluxograma 2 – Árvore de parâmetros para o projeto.....	82

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Tempo de aceleração	87
Gráfico 2 – Comparação do peso atribuído ao veículo	92
Gráfico 3 – Viabilidade de custo para o sistema de propulsão.....	93
Gráfico 4 – Seleção de alternativas	94
Gráfico 5 – Alternativas para o inversor de frequência.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFAVEA – Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores

AWD – Condução em Todas as Rodas *All Wheel Drive*

BLDC – Corrente Contínua Sem Escovas *Brush-Less Direct Current*

CA – Atributos do Cliente *Customer Attributes*

CO₂ – Dióxido de Carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CV – Cavalo Vapor

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura

DP – Parâmetros de Projeto *Design Parameters*

FWD – Condução nas Rodas Dianteiras *Front Wheel Drive*

HP – Cavalo Vapor *Horse Power*

IPI – Imposto sobre Produtos Industrializados

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MP – Material Particulado

NMHC – Hidrocarbonetos Não Metanos

NO_x – Óxido de Nitrogênio

PIB – Produto Interno Bruto

PNMA – Política Nacional do Meio Ambiente

PRONAR – Programa Nacional de Qualidade do Ar

PV – Variáveis do Processo *Process Variables*

RF – Requisitos Funcionais *Functional Requirements*

rpm – Rotações por Minuto

RWD – Condução nas Rodas Traseiras *Rear Wheel Drive*

SAE – Sociedade de Engenharia Automotiva *Society of Automotive Engineers*

SRM – Motor de Relutância Variável *Switched Reluctance Motor*

THC – Hidrocarbonetos Totais

LISTA DE SÍMBOLOS

g	Aceleração gravitacional	m/s ²
a	Aceleração	m/s ²
α	Ângulo de inclinação da pista	%
A_F	Área frontal do veículo	m ²
Cd	Coefficiente de arraste aerodinâmico	[adimensional]
f_R	Coefficiente de atrito ao rolamento	[adimensional]
μ_e	Coefficiente de atrito estático	[adimensional]
C_n	Conjugado nominal	N.m
K	Constante de motor trifásico	[adimensional]
ρ_a	Densidade do ar	kg/m ³
η_T	Eficiência específica do sistema de transmissão	[adimensional]
s	Escorregamento da máquina	%
Fp	Fator de potência	[adimensional]
Fa	Força de aceleração	N
Fwa	Força de inércia equivalente dos componentes girantes	N
Fw	Força de resistência aerodinâmica	N
Fg	Força de resistência ao aclave	N
FR_r	Força de resistência ao rolamento	N
Fx	Forças resistivas	N
f_1	Frequência de alimentação da fonte aplicada ao estator	Hz
f	Frequência de corrente alternada	Hz
m	Massa do veículo	kg
$m'v$	Massa equivalente dos componentes girantes	kg
m_e	Massa equivalente	kg
I_{rot}	Momento de inércia do conjunto girante	kg.m ²
p	Número de polos	[adimensional]
$P_{tração}$	Potência de tração	kW
P_n	Potência nominal do motor	W
rd	Raio dinâmico roda/pneu	m

i_g	Relação de transmissão	[adimensional]
η	Rendimento do motor elétrico	[adimensional]
n	Rotação eixo do motor	rpm
n_N	Rotação nominal do motor	rpm
t	Tempo	s
V_F	Tensão de fase	V
Tr	Torque de tração nas rodas	N.m
Tm	Torque do motor	N.m
V	Velocidade do veículo	m/s
Vv	Velocidade do vento	m/s
n_s	Velocidade síncrona	rad/s
I_a, I_b, I_c	Corrente de fase máxima do enrolamento	A

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Definição do tema.....	18
1.2 Delimitações.....	18
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo geral.....	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
1.4 Justificativa.....	19
1.5 Estrutura do trabalho.....	20
2 REVISÃO TEÓRICA	23
2.1 Legislações ambientais para a qualidade do ar.....	23
2.2 Sistema de propulsão	24
2.2.1 Força de resistência ao rolamento	25
2.2.2 Força de resistência a aclives	26
2.2.3 Força de resistência aerodinâmica	28
2.2.4 Força de resistência angular	29
2.2.5 Força de resistência na aceleração	30
2.2.6 Força de tração	30
2.2.7 Aceleração.....	31
2.3 Configuração para o sistema de propulsão	32
2.3.1 Propulsão convencional	32
2.3.2 Propulsão híbrida	33
2.3.3 Propulsão alternativa	36
2.4 Veículos elétricos.....	37
2.4.1 Histórico dos veículos elétricos	37
2.4.2 Configurações	40
2.5 Principais equipamentos do subsistema de propulsão de veículos elétricos.....	43
2.5.1 Motor elétrico	43
2.5.2 Fonte de energia	53
2.6 Conversor eletrônico de potência	56
2.7 Método para projetos	59
3 ESTADO DA ARTE.....	65
4 METODOLOGIA.....	75

4.1 Fase 1: Dinâmica veicular atribuída ao projeto	75
4.2 Fase 2: Configuração do sistema de trem de força.....	78
4.3 Fase 3: Equipamentos atribuídos ao subsistema de tração	83
5 RESULTADOS.....	91
6 CONCLUSÕES	97
REFERÊNCIAS	101
ANEXO A – MATRIZ AXIOMÁTICA PARA O PROJETO.....	111
ANEXO B – COMPARATIVO DE DADOS TÉCNICOS.....	115

1 INTRODUÇÃO

A qualidade do ar e a saúde ambiental estão bastante comprometidas nos dias atuais, para melhorá-las há, entre outros fatores, a necessidade de reduzir emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros poluentes resultantes dos motores de combustão interna dos veículos, cuja principal fonte de energia para propulsão ocorre pela queima de derivados do petróleo pelos combustíveis. (BORSARI, 2009). Com o objetivo de melhorar a qualidade de vida humana e de todos os seres vivos, certificações ambientais vêm sendo implementadas para que a sociedade e as indústrias se adaptem a um desenvolvimento sustentável e renovável. A Figura 1, a seguir, apresenta a poluição atmosférica nos grandes centros, tomando como exemplo a cidade do Rio de Janeiro.

Figura 1 – Poluição atmosférica na cidade do Rio de Janeiro



Fonte: Langanke (2015).

No Brasil, a Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) dispõe através da Lei n. 6.938, no Art. 2º, a preservação, melhoria e recuperação de condições ambientais propícias à vida, sendo normatizado pelas resoluções o Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. (BRASIL, 1981). Dessa forma, as montadoras de veículos se obrigaram a adequar o sistema de propulsão com motor de combustão interna conforme as normas vigentes nacionais e internacionais, que visam reduzir a emissão de gases poluentes.

Segundo Mello, Marx e Souza (2013), no Brasil, a utilização de pequenos veículos elétricos urbanos, ônibus e veículos utilitários poderia ser o caminho para o desenvolvimento no país de sistemas de tração elétrica. Baran (2012) afirma que a utilização da energia elétrica

em automóveis permitiria reduzir o consumo de gasolina em 40,3% em 2031, o que torna os veículos elétricos uma ótima alternativa.

O presente trabalho utiliza métodos e técnicas para o desenho de produtos, que sustentam o processo de criação e desenvolvimento do projeto conceitual e de dimensionamento de um sistema de propulsão para veículos elétricos populares, que visa promover uma rápida inserção de veículos elétricos nos centros urbanos do Brasil.

1.1 Definição do tema

Diante do agravante da poluição atmosférica nos grandes centros do Brasil, na grande maioria causada por veículos automotores, e da perspectiva futura de utilizar a energia elétrica como fonte alternativa de propulsão, surge como opção para uma rápida inserção dos veículos elétricos em centros urbanos a utilização de equipamentos industriais para o sistema de propulsão. Esta pesquisa explora o mercado nacional quanto a equipamentos industriais fabricados em escala de produção que possam ser introduzidos em um veículo urbano, com capacidade para dois ocupantes e com propulsão elétrica que possa apresentar rápida inserção em centros urbanos. Avalia-se a dinâmica longitudinal de um veículo, para caracterização de um subsistema de propulsão elétrico, tendo como principais aspectos equipamentos de circulação e reposição ao mercado comum, como, por exemplo, motores elétricos, inversores de frequência, baterias e módulos de potência.

1.2 Delimitações

Dentre as delimitações para o desenvolvimento desta pesquisa, destacam-se:

- Sistemas de propulsão de veículos populares para dois ocupantes.
- Propulsão totalmente elétrica.
- Desempenho de propulsão da dinâmica longitudinal veicular.
- Exploração de equipamentos elétricos por meio de catálogos de fabricantes.
- Equipamentos do subsistema de propulsão de veículos elétricos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Propor uma configuração alternativa para a propulsão através de equipamentos elétricos industriais, para que estes possam ser utilizados no sistema de propulsão de veículos elétricos. Desta forma, poder contribuir para melhor qualidade do ar em centros urbanos e poder proporcionar uma dissipação dos veículos elétricos de forma popular através de equipamentos elétricos industriais produzidos em larga escala.

1.3.2 Objetivos específicos

São definidos cinco objetivos específicos:

1. Identificar equipamentos elétricos industriais que possam ser inseridos no sistema de propulsão elétrica para veículos urbanos.
2. Identificar uma configuração para o sistema de propulsão com melhor custo e benefício.
3. Avaliar as características dos equipamentos e sua viabilidade econômica para a propulsão de um veículo com tração elétrica.
4. Determinar parâmetros técnicos dos equipamentos existentes na indústria e confrontá-los com especificações de projeto da indústria automobilística para a viabilidade de propulsão.
5. Propor um sistema de propulsão elétrica para veículos com características populares, para rápida inserção no mercado brasileiro, buscando baixo custo e utilização em centros urbanos.

1.4 Justificativa

Um dos maiores desafios do século XXI é encontrar fontes de energia eficientes e renováveis, com vistas a melhorar a qualidade do ar nos grandes centros urbanos. A inserção de veículos elétricos em nosso país pode ser uma alternativa para reverter esse quadro, por isso propõe-se neste trabalho promover uma configuração de propulsão elétrica que possa apresentar rápida inserção desses veículos em centros urbanos através de equipamentos elétricos industriais que possam ser inseridos no sistema de propulsão. Dessa forma, atendem-

se às normas e resoluções ambientais, visto que o uso desse tipo de veículo reduzirá as emissões de poluentes.

Para dar aos veículos elétricos características populares, busca-se através do conceito de métodos axiomáticos, exploração da dinâmica veicular e dados técnicos em catálogos de fabricantes equipamentos elétricos utilizados na indústria. Os equipamentos em larga escala de produção apresentam custos de manufatura menores e, assim como na indústria, proporcionar desempenho no sistema de tração de um veículo, sendo que suas informações técnicas podem ser extraídas da base de dados de seus fabricantes. Uma configuração compacta pode oferecer melhor custo e benefício em transmitir energia de movimento às rodas do veículo através do sistema de tração.

As especificações dos equipamentos são determinadas após examinar as características da dinâmica veicular. Dessa forma, o subsistema de tração do veículo elétrico, em base de dados de fabricantes e viabilidade econômica, pode apresentar menor custo, podendo tornar os veículos elétricos melhor dimensionados e acessíveis economicamente aos usuários. Os parâmetros técnicos do projeto definem especificações mínimas de desempenho dos equipamentos elétricos industriais com base no desempenho de aceleração/desaceleração, potência e torque. O subsistema de tração elétrica com característica popular, que possa proporcionar desempenho característico semelhante a um veículo de motor de combustão interna popular, poderá prover o aumento do número de veículos elétricos circulantes nos centros urbanos brasileiros, gerando benefícios ambientais significativos.

1.5 Estrutura do trabalho

Este estudo avalia os equipamentos de uso geral com manufatura em larga escala utilizados na indústria que possam ser inseridos no sistema de propulsão de veículos elétricos, utilizando a técnica de engenharia por métodos axiomáticos. Para uma melhor compreensão desse assunto, a presente pesquisa será dividida em quatro capítulos, apresentados a seguir.

O Capítulo 1 apresenta a definição do tema, os objetivos gerais e específicos e a justificativa, destacando a motivação e importância desta pesquisa.

O Capítulo 2 aborda os principais elementos da literatura utilizada no desenvolvimento deste trabalho, como legislações ambientais para a qualidade do ar, destacando os principais programas sobre a qualidade do ar direcionada a veículos automotores, as forças dinâmicas que influenciam no desempenho para o sistema de propulsão e os modelos de configurações para o sistema de propulsão. Além disso, apresenta-

se um breve histórico dos veículos elétricos e sua contextualização no mercado brasileiro, bem como uma abordagem dos principais equipamentos do subsistema de propulsão nos veículos elétricos, detalhando os equipamentos que o compõem.

A revisão ao estado da arte ocorre no terceiro capítulo, destacando as principais pesquisas que serviram como base para o desenvolvimento deste trabalho.

O Capítulo 4 apresenta a modelagem matemática e os métodos aplicados para a validação dos equipamentos a serem utilizados no subsistema de propulsão.

Os resultados são apresentados no Capítulo 5, que demonstra as investigações para a viabilidade e o dimensionamento comparados ao sistema de propulsão de um veículo com motor de combustão interna e configuração de transmissão nas rodas traseiras.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões da pesquisa, definindo o modelo da configuração de tração mais adequado para um veículo elétrico, através de equipamentos industriais de propósito gerais com manufatura em larga escala, de acordo com as características técnicas dos equipamentos e a viabilidade econômica para a configuração.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Legislações ambientais para a qualidade do ar

O CONAMA apresenta resoluções normativas para a qualidade do ar, como, por exemplo, a Resolução n. 005 de 1989, que institui o Programa Nacional de Qualidade do Ar - PRONAR (BRASIL, 1989), a Resolução 03/1990, que define padrões para a qualidade do ar (BRASIL, 1990), e a Resolução 18/1986, que constitui o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. (BRASIL, 1986). Essas resoluções atribuem limites na emissão de gases poluentes na atmosfera.

Com o passar dos anos, a Resolução n. 18 do PROCONVE sofreu algumas alterações, que ocorreram por fases, com vistas a contribuir para a redução de níveis de emissão de poluentes causados por veículos, promover o desenvolvimento tecnológico no mercado nacional, gerar programas de inspeção e manutenção em veículos circulantes, promover a conscientização da sociedade com relação à poluição causada por veículos automotores, estabelecer padrões de avaliação e resultados alcançados e melhorar as características técnicas de combustíveis para a redução de emissões de poluentes.

O Quadro 1, a seguir, apresenta as alterações nas fases conforme as atualizações das resoluções do – CONAMA. As fases estão dispostas de acordo com a categoria que o veículo apresenta e o tipo de combustível utilizado para o sistema de propulsão.

Quadro 1 – Evolução nas fases do PROCONVE

Veículos comerciais pesados		Veículos leves		Ciclomotores e similares		Máquinas agrícolas e rodoviárias	
Fase	Resolução	Fase	Resolução	Fase	Resolução	Fase	Resolução
P1	Resolução CONAMA n. 18/1985	L1	Resolução CONAMA n. 18/1986	M1	Resolução CONAMA n. 297/2002	MAR 1	Resolução CONAMA n. 433/2011
P2	Resolução CONAMA n. 8/1993	L2		M2			
P3		L3	M3	Resolução CONAMA n. 342/2003			
P4		L4	M4	Resolução CONAMA n. 432/2011			
P5	L5	Resolução CONAMA n. 315/2002					
P6	L6	Resolução CONAMA n. 415/2009					
P7	Resolução CONAMA n. 403/2008						

Fonte: Adaptado de Brasil (2012).

Os limites máximos de poluentes para motores de combustão interna de veículos que estão em circulação desde janeiro de 2013, com massa de ensaio inferior ou igual a 1.700 quilogramas para a fase L6 do PROCONVE, são dispostos no Art. 2º da Resolução n. 415, de 24 de setembro de 2009. (BRASIL, 2012).

Muitas pesquisas têm se destacado com o objetivo de reduzir os efeitos de poluentes do sistema de propulsão nos veículos, no entanto o sistema de propulsão elétrico apresenta melhores vantagens para a redução da poluição, por apresentar melhor eficiência, ser livre de poluentes atmosféricos e apresentar veículos mais silenciosos. (LOCH; HENKES, 2014).

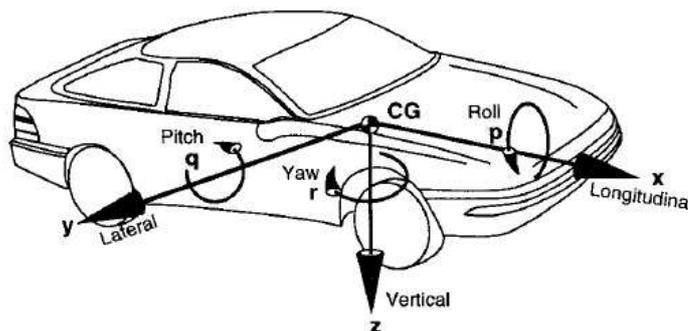
2.2 Sistema de propulsão

O automóvel tem a função de realizar o transporte de pessoas e cargas, proporcionando desempenho, dirigibilidade e conforto para seus ocupantes, sendo um dos meios de transporte mais populares do mundo.

Em relação aos diversos movimentos dinâmicos que possam ser provocados a um veículo, a norma SAE J670, com referência ao centro de gravidade, relaciona os movimentos longitudinais, laterais e verticais para o estudo de desempenho na tração e frenagem de um veículo. (BOSCH, 2005; GILLESPIE, 1992).

A referência de desempenho para as características de aceleração e desaceleração está relacionada à dinâmica longitudinal (eixo x). Para a dirigibilidade, está relacionada à dinâmica lateral (eixo y) condicionada às perturbações aplicadas ao volante e às excitações externas. A dinâmica vertical (eixo z) relaciona perturbações que possam ocasionar desconforto proveniente das irregularidades do terreno. A Figura 2, na sequência, identifica as referências nos eixos conforme a norma SAE J630.

Figura 2 – Referência dos eixos de coordenada



Fonte: Gillespie (1992).

Para o desempenho do automóvel, o sistema de propulsão necessita fornecer energia necessária para vencer as forças resistivas que se opõem ao seu movimento longitudinal. Dentre as forças que se opõem ao movimento, tem-se: força de resistência ao rolamento, inclinação de pista, resistência aerodinâmica, resistência de aceleração e resistência de inércia angular de transmissão. (GILLESPIE, 1992; CANALE, 1989; MADUREIRA, 1995).

A potência de tração ($P_{tração}$) necessária para vencer as forças resistivas ao movimento longitudinal do veículo pode ser definida através da equação 2.1.

$$P_{tração} = \sum Fx \cdot V \quad [kW] \quad (2.1)$$

Onde, Fx refere-se às forças resistivas que se opõem ao movimento do veículo, e V , à velocidade constante do veículo.

2.2.1 Força de resistência ao rolamento

A força de resistência ao rolamento (FR_r) ocorre através da área de contato do pneu com o solo, sendo a deformação elástica do pneu em contato com o solo e a variação de penetração do pneu ao solo os principais fatores do aumento da resistência. A força de resistência ao rolamento pode ser determinada através da equação 2.2. (CANALE, 1989; AHMED; BHUTIA, 2015).

$$FR_r = fr \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad [N] \quad (2.2)$$

Onde, fr é o coeficiente de atrito ao rolamento; m , massa do veículo; g , força da gravidade; α , ângulo de inclinação da pista.

O fator do coeficiente de atrito fr apresenta um valor adimensional por ser o cociente de quantidades cujas unidades se cancelam. Seus valores são dependentes de certas propriedades físicas envolvidas, como a característica do solo, variação de pressão do pneu, o diâmetro do pneu, a velocidade, força de tração, carga radial e temperatura. (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2002; MADUREIRA, 1995; BOSCH, 2005).

Valores apurados do fr em pistas de concreto em função da variação da pressão dos pneus e a velocidade do veículo foram desenvolvidos pelo Instituto de Tecnologia de

Stuttgart, que indica que o coeficiente de atrito de contato do pneu com o solo não somente influencia na pressão interna como também na velocidade. Isso ocorre devido ao trabalho de flexão e vibração do pneu através da pressão interna e da velocidade aplicada. (TABOREK, 1957).

O Quadro 2, a seguir, apresenta o coeficiente de atrito do rolamento dependente das características de diferentes pavimentos.

Quadro 2 – Coeficiente de atrito de rolamento

Superfície do pavimento	Coeficiente de resistência ao rolamento
Pavimentação com laje pequena	0,013
Pavimentação com laje grande	0,013
Concreto, asfalto	0,011
Cascalho	0,02
Macadame alcatroado	0,025
Rodovia não pavimentada	0,05
Terra	0,1 ... 0,035
Pneus de caminhão em concreto, asfalto	0,006 ... 0,01
Rodas com percinta na terra	0,14 ... 0,24
Trator de trilhos na terra	0,07 ... 0,12
Roda sobre trilho	0,001 ... 0,002

Fonte: Adaptado de Bosch (2005).

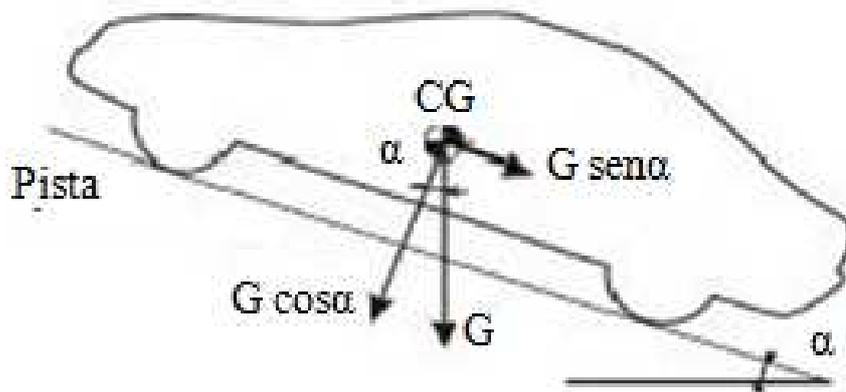
2.2.2 Força de resistência a aclives

A força de resistência a aclives (F_g) é a resultante da força peso do veículo que atua paralela à pista em um plano de inclinação α , que se opõe ao movimento do veículo. A força necessária de resistência a aclives pode ser definida através da equação 2.3. (NOCE, 2009).

$$F_g = m \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha) \quad [N] \quad (2.3)$$

O ângulo α se define como o ângulo ascendente de inclinação de uma rampa no plano horizontal, identificado na Figura 3, a seguir.

Figura 3 – Forças atuantes no veículo em rampa



Fonte: Noce (2009).

O ângulo α de inclinação de uma pista é dado por sua declividade, sendo a tangente do seu ângulo de inclinação expresso em percentual de inclinação. Por exemplo, uma rampa com inclinação de 10° é dada como referência à tangente de 10° , que apresenta seu valor de aproximadamente 0,18, que pode ser interpretado como uma declividade de 18% ao deslocamento horizontal. (SILVEIRA, 2007).

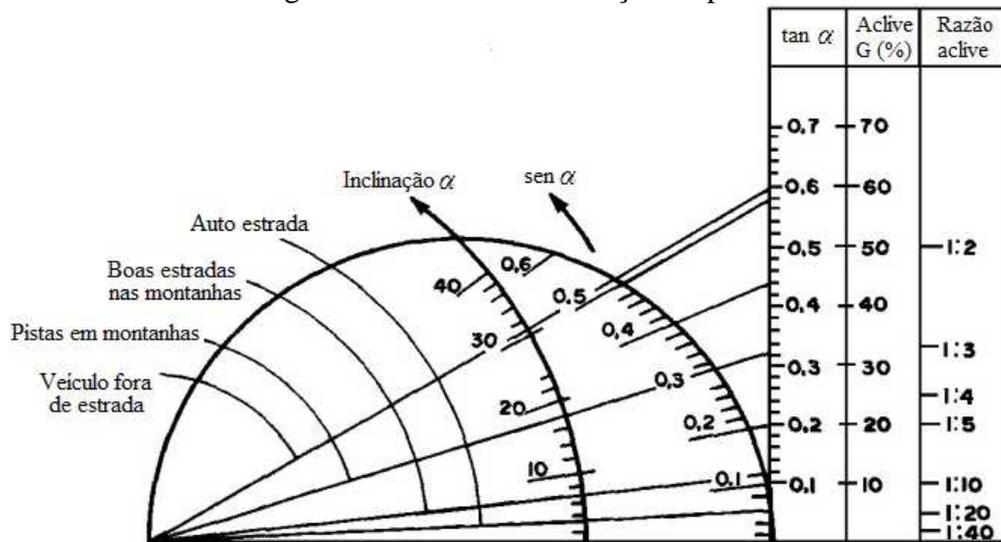
Silveira (2007), através da equação 2.4, afirma que a inclinação máxima a vencer por um veículo com tração simples em duas rodas, independentemente do torque que o sistema de propulsão possa fornecer a rodas, é inferior a 30° .

$$\alpha < \arctan g \left(\frac{\mu_e}{2} \right) \quad (2.4)$$

O valor adimensional de μ_e representa o coeficiente de atrito estático entre o pneu e o pavimento, sendo seu valor considerado 0,5 para pavimento de asfalto seco e 0,3 para asfalto molhado.

A Figura 4, a seguir, apresenta o ábaco de inclinação de pista, que associa o ângulo, a porcentagem e a razão de inclinação de pista entre si.

Figura 4 – Ábaco de inclinação de pista



Fonte: Canale (1989).

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte – DNIT, de acordo com o art. 15, apresenta recomendações a inclinações máximas em estradas de rodagem e o Código de Trânsito Brasileiro – CTB, de acordo com o art. 61, regulariza a velocidade máxima de circulação e conduta em condições de trânsito. (BRASIL, 1973; BRASIL, 1997).

2.2.3 Força de resistência aerodinâmica

As características aerodinâmicas dos veículos podem ser determinadas através de ensaios em túneis aerodinâmicos, tendo como objetivo avaliar os efeitos da interação da carroceria com a da passagem do ar. (MADUREIRA, 1995).

As principais causas de resistência aerodinâmica a se considerar são:

- A forma do veículo, que pode apresentar um fluxo de ar laminar ou turbulento.
- A sustentação pela diferença de pressão entre a área superior e inferior.
- O atrito na superfície ocasionando perdas ao limite de escoamento.
- As interferências ao apresentar perdas adicionais por acessórios.
- O fluxo interno ocasionado pelos dutos de ventilação e compartimento do motor.

A força de resistência aerodinâmica (F_w) pode ser determinada através da equação

2.5.

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_d \cdot A_f (V - V_v)^2 \quad [N] \quad (2.5)$$

Onde, ρ_a refere-se à massa específica do ar. A densidade do ar altera-se com a altitude, umidade e temperatura do ar, no entanto o valor aproximado de $1,25 \text{ kg/m}^3$ pode ser levado como referência. Cd é o coeficiente de arraste aerodinâmico, Af , área frontal do veículo, V , velocidade do veículo, e Vv , velocidade do vento.

O coeficiente de arraste aerodinâmico pode ser determinado através de ensaio de túnel de vento, ou análise computacional que determina o coeficiente de penetração aerodinâmico do veículo. (NOCE, 2009).

A característica de penetração aerodinâmica da carroceria em ensaio de túnel de vento é ilustrada na Figura 5, a seguir, através de jatos de ar.

Figura 5 – Teste de aerodinâmica em túnel de vento



Fonte: Mercedes-Benz (2015).

2.2.4 Força de resistência angular

As forças de resistência equivalente angular provêm da inércia da aceleração centrípeta das partes girantes do sistema do veículo, como rodas, acoplamento do sistema de propulsão com a transmissão, eixos e componentes girantes do sistema de transmissão. (DUQUE, 2010; TANAKA, 2013).

De acordo com a norma J1263 (SAE INTERNACIONAL, 2010), a massa equivalente (m_e) para cada componente girante pode ser calculada através da equação 2.6.

$$m_e = \frac{I_{rot}}{rd} \quad [kg] \quad (2.6)$$

Onde, I_{rot} é o momento de inércia do conjunto girante, e rd , o raio dinâmico da roda/pneu.

Ainda de acordo com a norma J1263 (SAE INTERNACIONAL, 2010), não sendo disponíveis os dados de inércia, a massa equivalente dos componentes girantes (m'_v), com a transmissão em neutro, pode ser estimada sendo 3% da massa do veículo, conforme apresenta a equação 2.7.

$$m'_v = 3\% \cdot m \quad [kg] \quad (2.7)$$

A força de inércia equivalente aos componentes girantes (Fwa) pode ser dada pela equação 2.8.

$$Fwa = m'_v \frac{dV(t)}{dt} \quad [N] \quad (2.8)$$

2.2.5 Força de resistência na aceleração

A força de aceleração (Fa) representa a taxa de variação temporal da velocidade sendo produzida por uma força necessária aplicada para ocorrer a variação de velocidade por um dado tempo, podendo representar a força necessária para poder deslocar a massa do veículo a uma variação de velocidade constante em um período de tempo, fornecendo uma aceleração linear. (HEWITT, 2015).

A equação 2.9 representa a força de resistência na aceleração dada pela segunda lei de Newton.

$$Fa = m \frac{dV(t)}{dt} \quad [N] \quad (2.9)$$

2.2.6 Força de tração

No veículo, a força de tração é definida pelo torque propulsor direcionado às rodas, que se origina através do motor de propulsão juntamente com o sistema de transmissão e pode realizar uma variação escalar de velocidade e força. Dessa forma, podem ser geradas

diferentes forças apropriadas para as rodas motrizes em todas as condições de locomoção e obter melhor rendimento. (TANAKA, 2013).

O torque de tração nas rodas (Tr) pode ser obtido através do produto de força resultante de tração e o raio dinâmico da roda/pneu, conforme equação 2.10.

$$Tr = \sum Fx \cdot rd \quad [N.m] \quad (2.10)$$

O torque do motor pode ser obtido através da equação 2.11. (GILLESPIE, 1992; TANAKA, 2013).

$$Tm = \frac{1}{\eta_t \cdot i_g} \cdot \sum Fx \cdot rd \quad [N.m] \quad (2.11)$$

Onde, Tm é o torque do motor, η_t , eficiência específica do sistema de transmissão, e i_g , relação de transmissão.

2.2.7 Aceleração

As características de desempenho do veículo são definidas na aceleração e desaceleração para a dinâmica longitudinal. A aceleração define a variação da velocidade a um determinado período de tempo para o desempenho do veículo. (ECKERT, 2013).

A aceleração pode ser definida pela equação 2.12.

$$a = \frac{dV}{dt} \quad [m/s^2] \quad (2.12)$$

A rotação necessária para o motor fornecer a velocidade máxima do veículo é determinada através da equação 2.13.

$$n_N = i_g \cdot \frac{V}{rd \cdot (2\pi / 60)} \quad [rpm] \quad (2.13)$$

Onde, n_N é a rotação no eixo do propulsor.

2.3 Configuração para o sistema de propulsão

O sistema para proporcionar movimento no veículo é denominado conjunto trem de força e incluem componentes como: motor para propulsão, sistema de transmissão, eixos, conjunto diferencial e rodas. As fontes de propulsão podem ser classificadas em convencional, híbrida ou alternativa. (MASHAD; CROLLA, 2009; FERRAZ, 2004). O sistema de trem de força a ser implementado no veículo se caracteriza pelo modelo do veículo e pelo sistema de tração conectado às rodas. (LECHNER; NAUNHEIMER, 1999).

A configuração do sistema de tração apresenta efeitos sobre o tipo de aplicação do veículo, economia, segurança e espaço disponível. Dessa forma, a tração pode operar nas rodas dianteiras (FWD – *Front-Wheel Drive*), nas rodas traseiras (RWD – *Rear-Wheel Drive*) ou mesmo com tração em todas as rodas (AWD – *All-Wheel Drive*).

2.3.1 Propulsão convencional

A propulsão convencional é realizada por meio de motores de combustão interna, que transformam a energia química de combustíveis como diesel, etanol, gasolina, gás etc. em energia térmica através da combustão, gerando trabalho mecânico em forma de rotação. (MARTINELLI, 2010; BOSCH, 2005).

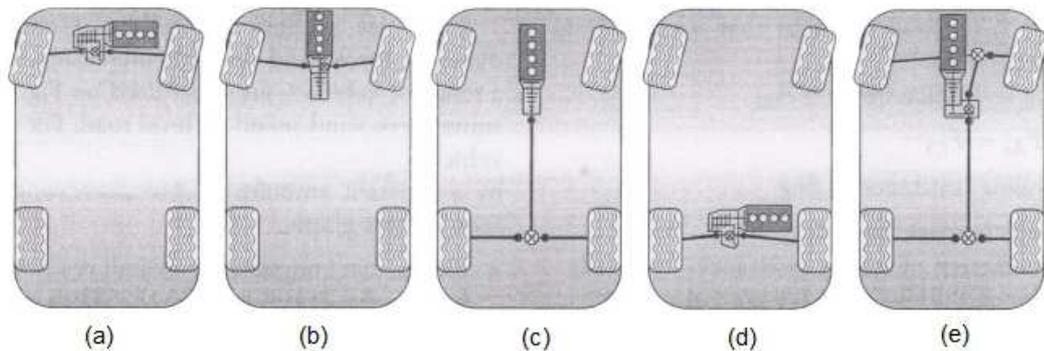
Os motores de combustão interna podem ser classificados de acordo com:

- a) As características das propriedades do gás na admissão.
- b) O sistema de ignição.
- c) O movimento dos pistões para compressão.
- d) O ciclo de trabalho.
- e) As aplicações.
- f) A disposição.
- g) O número de cilindros.

Os motores de combustão interna são utilizados na grande proporção dos veículos leves e comerciais. (BALL; STONE, 2004; RAJPUT, 2007).

A Figura 6, a seguir, apresenta as configurações para o trem de força utilizado em sistemas convencionais.

Figura 6 – Configuração do trem de força para sistema convencional



Fonte: Crolla (2009).

Legenda:

- (a) Configuração com o motor transversal e tração dianteira, sendo frequentemente utilizada em veículos atuais apresentando-se de forma compacta.
- (b) Configuração com o motor montado de forma longitudinal.
- (c) Motor e transmissão montados na frente do veículo de forma longitudinal com tração traseira, configuração utilizada na maioria de veículos comerciais.
- (d) e (e) Como alternativa podem ser utilizados o motor traseiro e a tração traseira, assim como um motor dianteiro com tração em todas as rodas.

2.3.2 Propulsão híbrida

Os veículos híbridos apresentam uma combinação de propulsão através de duas ou mais fontes de energia, geralmente pela configuração combinada com um motor elétrico e um motor de combustão interna, denominados veículos elétricos híbridos, proporcionando uma forma alternativa para a redução de poluentes atmosféricos. (CASTRO *et al.* 2009).

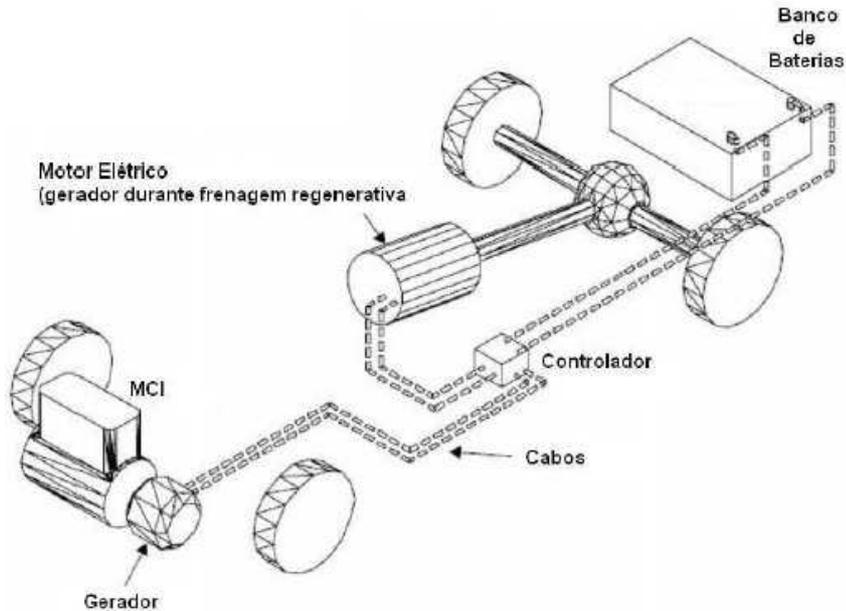
Os veículos elétricos híbridos podem ser classificados de acordo com as características de arquitetura e a forma como é gerada a energia de propulsão pelas diferentes fontes e transmitida às rodas, sendo em série, paralelo ou *split*. (CORRÊA, 2013; CROLLA, 2009; LARMINIE; LOWRY, 2003; REVOREDO, 2007). A configuração em série é aplicada com maior ênfase em sistemas de alta potência (150 kW-1000 kW), possui um motor de combustão interna conectado em série a um gerador e ao motor elétrico, obtendo maior eficiência e menor emissão de gases poluentes.

Um banco de baterias fornece energia ao motor elétrico para proporcionar tração às rodas do veículo. Dessa forma, quando a carga da bateria se apresenta em um estado mínimo predeterminado, o gerador é acionado pelo motor de combustão interna e desligado quando a bateria apresenta estado desejável.

A configuração em série não apresenta conexões mecânicas entre o motor de combustão interna e as rodas de tração do veículo, servindo apenas para gerar energia ao banco de baterias. No entanto, o motor elétrico e a bateria se apresentam em dimensões

volumosas na configuração em série, o que representa desvantagem ao sistema quanto ao processo de carga e descarga da bateria. A Figura 7, a seguir, ilustra a configuração em série para veículos elétricos híbridos.

Figura 7 – Configuração em série de veículo elétrico híbrido

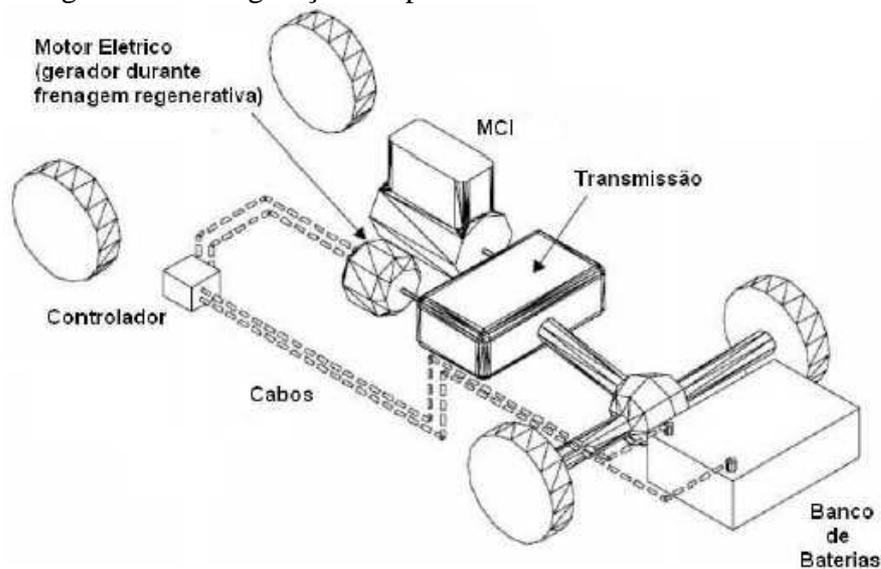


Fonte: Revoredo (2007).

A configuração em paralelo é utilizada em veículos com menor potência, estando o motor de combustão interna e o motor elétrico operando de forma paralela acoplados mecanicamente para elevar a potência do sistema e transmitindo diretamente às rodas. A essa configuração os motores operam de forma simultânea, podendo o motor de combustão interna ou motor elétrico operar unicamente ou mesmo na combinação de ambos.

O motor elétrico, alimentado pelo banco de baterias, fornece a partida no motor de combustão interna quando solicitado e tração ao veículo em baixas velocidades quando a bateria está carregada. O motor de combustão interna, quando em funcionamento, fornece tração ao veículo em velocidade de cruzeiro e carrega a bateria de forma simultânea através do próprio motor elétrico. Essa configuração requer estratégias de controle específicas, sendo uma desvantagem comparada à configuração em série. A Figura 8, a seguir, ilustra a configuração em paralelo para veículos elétricos híbridos.

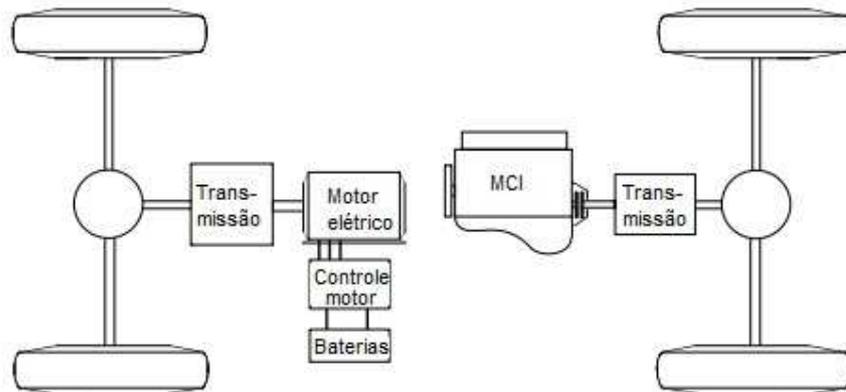
Figura 8 – Configuração em paralelo de veículo elétrico híbrido



Fonte: Revoredo (2007).

A configuração *split* apresenta uma derivação da configuração em paralelo, o que consiste em separar as fontes de propulsão para tracionar eixos diferentes. Como exemplo, na Figura 9, a seguir, o motor elétrico transmite tração no eixo dianteiro através do banco de baterias, e o motor de combustão interna transmite tração no eixo traseiro.

Figura 9 – Configuração em *split* de veículo elétrico híbrido



Fonte: Adaptado de Ehsani *et al.* (2004).

Alguns critérios devem ser analisados para projetar o veículo elétrico híbrido, tendo como principal critério o sistema de propulsão. Além deste, destacam-se:

- *Características de desempenho*: autonomia, aceleração, velocidade máxima e capacidade de carga.
- *Emissões*: deve atender à regulamentação vigente.

- *Desempenho de segurança:* condução e frenagens adequadas, proteção contra materiais perigosos e boa resistência em acidentes.
- *Custos:* de aquisição, operação e reparos moderados.
- *Conveniência no abastecimento.*
- *Durabilidade e resistência.*
- *Apresentar conforto:* baixo nível de ruído, capacidade de acomodar passageiros e volume para armazenamento de carga etc.

2.3.3 Propulsão alternativa

Entre as fontes alternativas de propulsão, destacam-se a energia elétrica, energia solar e célula de combustível. (EHSANI *et al.* 2004).

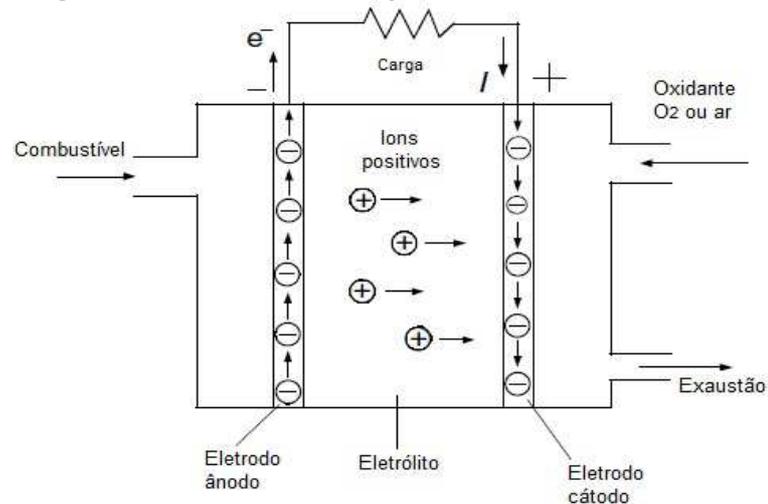
Os veículos elétricos que são movidos por energia elétrica são impulsionados através de um ou mais motores elétricos alimentados por um banco de baterias, que são recarregáveis em uma rede de distribuição elétrica. Esses veículos não exigem um sistema de transmissão mecânica, pois apresentam baixo nível de ruído, partida suave, baixas vibrações e não emitem poluentes.¹

O sistema de propulsão com célula de combustível apresenta elementos que transformam a energia química em energia elétrica, possibilitando boa autonomia. No entanto, as células de combustível não são capazes de armazenar energia, o que torna adequado serem aplicadas em veículos elétricos como fonte na configuração híbrida, através de controle de fluxo de potência.

A reação química apresenta-se semelhante a uma bateria química, o combustível é fornecido ao eletrodo ânodo, sendo os elétrons liberados do combustível. Os elétrons, pela diferença de potencial, podem fluir para o eletrodo cátodo, em combinação com os íons positivos, e no oxigênio é produzida a reação para a exaustão em forma de vapor de água. A Figura 10, a seguir, apresenta o processo de reação.

¹ As características de funcionamento são apresentadas no item 2.4.

Figura 10 – Processo de reação de célula de combustível



Fonte: Adaptado de Ehsani *et al.* (2004).

A propulsão com energia solar tem como característica prover energia através da radiação dos raios solares, e seu funcionamento apresenta-se semelhante aos modelos de células de combustível. A tração é imposta por motores elétricos que utilizam a energia de radiação solar armazenada em uma bateria sendo transformada em energia elétrica. Os veículos movidos com energia solar também podem rodar à noite, desde que possa apresentar carga suficiente na bateria acumulada durante o dia.

2.4 Veículos elétricos

2.4.1 Histórico dos veículos elétricos

Nas primeiras demonstrações de veículos elétricos, apresentadas na década de 1830, eram utilizadas baterias não recarregáveis, o que perdurou até o final do século XIX. Porém, com o início da produção de baterias recarregáveis, os veículos elétricos tornaram-se amplamente utilizados, principalmente como táxis, em 1897, na Inglaterra. (BARRETO, 1986).

O grande marco de comercialização de veículos elétricos ocorreu de 1890 a 1910, quando havia numerosas marcas de carros de passeio, táxis, veículos comerciais e ônibus. O Electrobat (Figura 11) foi o primeiro veículo elétrico comercial que operava como táxi em New York, projetado e construído pelo engenheiro mecânico Henry G. Morris e pelo químico Pedro G. Salom na Filadélfia, sendo patentado em 1894.

Figura 11 – Electrobat (1894)



Fonte: Electric... (2010).

No início do século XX, os veículos elétricos se apresentavam como fortes concorrentes para o futuro do transporte rodoviário. No entanto, com a descoberta de petróleo nos campos do Texas e o desenvolvimento tecnológico para a destilação, o preço de derivados de petróleo foi reduzido. (LARMINIE; LOWRY, 2003). Em seguida, a bateria que fornecia energia para propulsão no veículo elétrico foi utilizada para fornecer energia ao motor de partida de motores de combustão interna, sistema pelo qual poderia dar a partida sem haver a interferência manual direta. Ademais, a descoberta de campos de petróleo no Oriente Médio na década de 1940 favoreceu o desenvolvimento de veículos com motor de combustão interna.

No início da década de 1970, com o agravamento da poluição ambiental em grandes centros urbanos, começou-se a considerar o veículo elétrico como fonte para solução ambiental. Assim como, no final da década de 1970, com o agravamento da crise do petróleo, os veículos elétricos foram considerados como fonte alternativa de eficiência energética, no entanto apresentavam preços de comercialização elevados. (VASCONCELLOS, 2008).

Com o crescente aumento dos níveis de poluição ambiental identificados na conferência Rio-92, em 11 de dezembro de 1997 foi assinado o protocolo de Kyoto no Japão, em que foram fixadas metas para reduzir as emissões de poluentes em países industrializados, com o objetivo de reduzir os gases de efeito estufa. (NOCE, 2009).

O GM-EV1, da General Motors, lançado em 1996, foi considerado o grande marco dos veículos elétricos. Com 1.117 unidades produzidas, nunca foi comercializado, apenas utilizado em contratos de aluguel de longa duração. Por questões estratégicas, deixaram de ser produzidos em 1999, e os contratos não foram renovados, sendo recolhidos todos os veículos. (GENERAL MOTORS, 2010).

Apesar de os veículos elétricos apresentarem seus primeiros registros no século XIX, o Brasil apresenta tecnologias recentes para os contextos atuais. Por motivos econômicos, a produção de veículos elétricos esteve parada por mais de uma década, retornando recentemente por questões ambientais. (FRANCISCHETTI; SANTOS; SILVA, 2014).

Com a crise do petróleo na década de 1970, a Gurgel Motores S/A lançou o Itaipu, em 1974, em homenagem à Hidrelétrica de Itaipu construída entre o Brasil e o Paraguai. Era um modelo de VE com tecnologia brasileira de uso exclusivo urbano para duas pessoas, que mais tarde se chamou E400. (GURGEL MOTORES S/A, 2015). Em 1990, com a isenção do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) para veículos com motor de capacidade inferior a 1.000 cm³, montadoras estrangeiras presentes no Brasil lançaram veículos com essa motorização, apresentando valores de comercialização inferiores ao modelo da Gurgel. Ainda no mesmo ano, tornou-se liberada a importação de veículos, o que agravou as condições financeiras da Gurgel, que em 1993 encerrou suas atividades.

A Fiat Automóveis S/A, desde 2006, juntamente com a Itaipu Binacional e a suíça KWO Grimselstrom, desenvolve o projeto do Palio Weekend Elétrico (Figura 12). Há 66 unidades que circulam no Parque Nacional do Iguaçu (PR) e no arquipélago de Fernando de Noronha (PE), onde são realizadas pesquisas para a capacitação de profissionais e desenvolvimento de componentes em veículos elétricos. Esses veículos não são comercializados no país. (FIAT AUTOMÓVEIS S/A, 2015b).

Figura 12 – Fiat Palio Weekend Elétrico



Fonte: Fiat Automóveis S/A (2015b).

Outros avanços em pesquisas de veículos elétricos, juntamente com a Itaipu Binacional, apresentam o carro conceito da Fiat Automóveis S/A FCC II, de 2008 (Figura 13),

e com a montadora Renault o modelo Twizy, de 2014 (Figura 14). Esses veículos não são comercializados no país. (ITAIPU BINACIONAL, 2014).

Figura 13 – Fiat FCC II



Fonte: Fiat Automóveis S/A (2015a).

Figura 14 – Renault Twizy



Fonte: Itaipu Binacional (2014).

2.4.2 Configurações

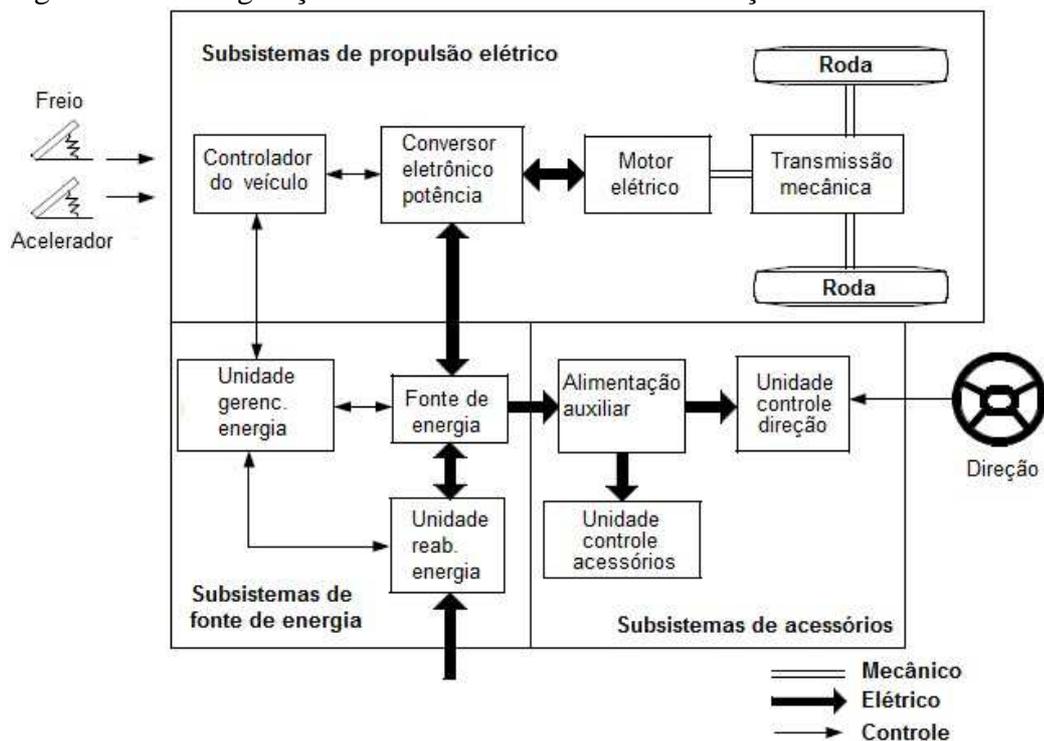
Os veículos elétricos utilizam um motor elétrico para o sistema de tração com as rodas e baterias químicas, células de combustível ou ultracapacitores como fontes de energia, apresentando vantagens por não emitir poluentes atmosféricos e alta eficiência. (EHSANI *et al.* 2004; HORI; MAEDA; FUJIMOTO, 2012).

O sistema de trem de força para um veículo elétrico é composto por três subsistemas principais: subsistema para propulsão, subsistema de fonte de energia e subsistemas auxiliares. O subsistema de propulsão é composto pelo controlador do veículo, conversor eletrônico de potência, motor elétrico, sistema de transmissão e pelas rodas motrizes. O subsistema de energia é composto pela fonte de energia recarregável, unidade de gestão de

energia e unidade de reabastecimento de energia. Os subsistemas auxiliares compõem-se da unidade de direção assistida, unidade de alimentação auxiliar e unidade de sistemas auxiliares elétricos de conforto e conveniência do veículo.

O controlador do veículo, através dos sinais de entrada do pedal do acelerador e do pedal do freio, fornece sinal de controle ao conversor eletrônico de potência para controlar o fluxo de energia entre o motor elétrico e a fonte de energia. A unidade de gestão de energia, juntamente com a unidade de controle, controla a frenagem regenerativa e a recuperação de energia gerada a fim de monitorar a capacidade de utilização da fonte. Em seguida, a fonte de alimentação auxiliar fornece energia em diferentes níveis de tensão para os componentes dos sistemas auxiliares de conforto e conveniência. A Figura 15, a seguir, identifica o fluxo de funcionamento dos subsistemas do trem de força para veículos elétricos.

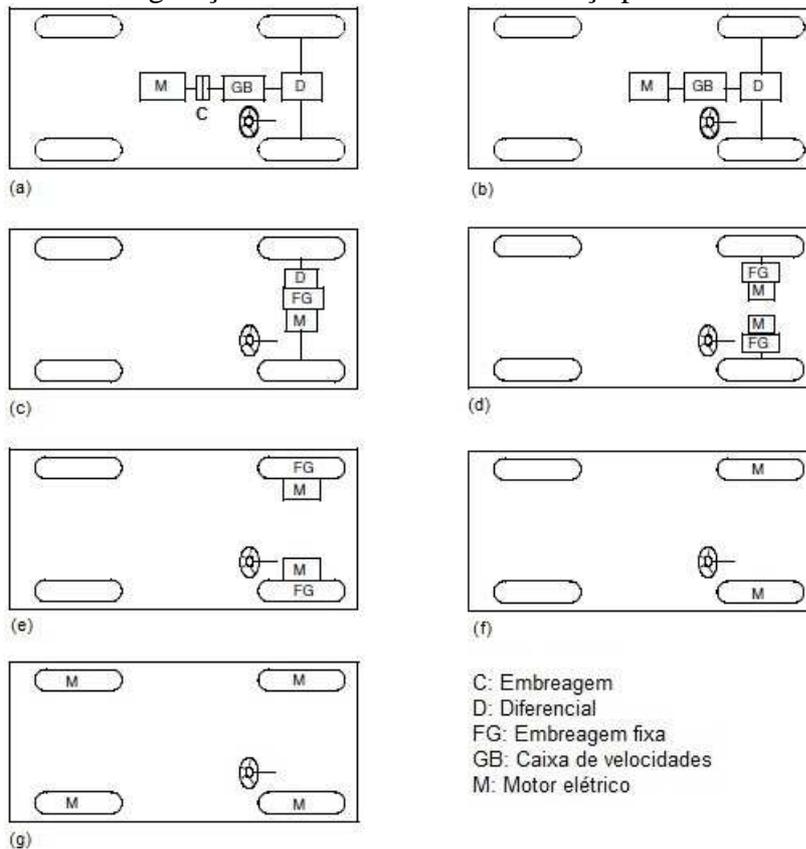
Figura 15 – Configuração dos subsistemas do trem de força em veículos elétricos



Fonte: Adaptado de Ehsani *et al.* (2004).

Na Figura 16, a seguir, são identificadas as possíveis configurações para o sistema de trem de força de veículos elétricos, determinadas de acordo com as características de propulsão e fonte de energia aplicada ao veículo.

Figura 16 – Configuração do sistema de trem de força para veículos elétricos



Fonte: Adaptado de Ehsani *et al.* (2004); Hori, Maeda e Fujimoto (2012).

A Figura 16 está dividida em itens, explicados na sequência.

O item **a** apresenta uma primeira alternativa para a configuração de trem de força, em que o motor elétrico substitui o motor de combustão interna em um sistema convencional. O sistema é composto por uma embreagem (C) para conectar e desconectar a força do motor ao sistema de transmissão e às rodas. A caixa de velocidades (GB) apresenta um conjunto de relações de transmissão para variar velocidade, potência e torque. O diferencial (D) permite impulsionar as rodas com velocidades diferentes para compensação em curvas.

O item **b** identifica uma alternativa com um motor elétrico que apresenta potência constante a uma faixa de velocidade mais longa. É constituído por uma embreagem fixa (FG) ao sistema de transmissão, ao qual possui a vantagem de reduzir o tamanho e peso da transmissão e simplifica o controle de trem de força, pois não necessita de troca de marchas.

No item **c**, o motor elétrico, a embreagem e o diferencial estão acoplados em um único conjunto, apresentando uma configuração simplificada e compacta.

Para o item **d**, o diferencial é substituído pelos motores elétricos acoplados diretamente na roda, que atuam em diferentes velocidades ao longo de uma trajetória em curva.

Na alternativa do item **e**, o motor elétrico de tração pode ser acoplado diretamente no interior da roda, podendo utilizar um conjunto planetário para reduzir a velocidade e aumentar o torque.

O item **f** apresenta uma alternativa em que o motor pode ser acoplado diretamente à roda sem haver necessidade de acoplamentos mecânicos por engrenagens. Esse arranjo requer ao motor um torque elevado para iniciar aceleração com baixas rotações, sendo o controle de velocidade do motor equivalente à velocidade da roda.

A alternativa do item **g** apresenta o acionamento direto dos motores elétricos conectados às rodas do veículo.

2.5 Principais equipamentos do subsistema de propulsão de veículos elétricos

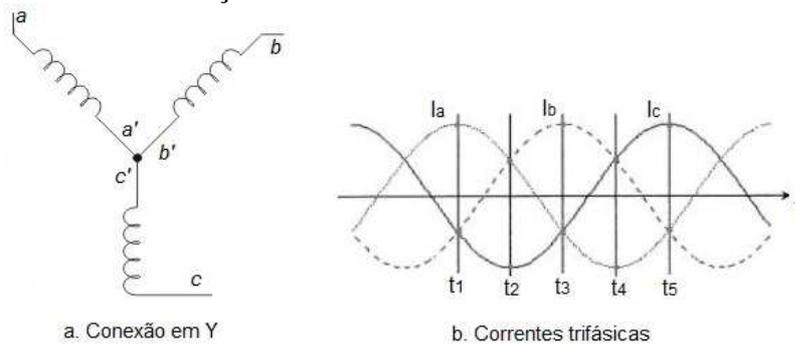
2.5.1 Motor elétrico

O motor elétrico pode ser considerado uma máquina elétrica. Em relação aos veículos elétricos, o motor elétrico se comporta de duas formas: como um motor de tração, quando solicitado torque de movimento de aceleração, e como um gerador, quando imposto ao veículo elétrico uma condição de frenagem, ocorrendo o reaproveitamento de energia elétrica. (BARBOSA, 2013; BUENO, 2004).

Para Rezek (2011), três tipos de máquinas podem funcionar como geradores tradicionais: máquina de indução assíncrona, máquina síncrona com fonte de corrente alternada e máquina de corrente contínua com fonte de corrente contínua. A máquina de indução assíncrona pode ser caracterizada por um motor de indução trifásico, que possui sua forma construtiva básica em estator e rotor, sendo amplamente utilizados na indústria devido a sua simplicidade, robustez e baixo custo. (DEL TORO, 1994).

O estator trifásico apresenta três bobinas e tem a função de conduzir o fluxo magnético onde são induzidas tensões por um campo girante em cada uma das bobinas, estando elas defasadas entre si em 120° , conforme a Figura 17, a seguir.

Figura 17 – Caracterização do enrolamento trifásico em motores assíncronos



Fonte: Adaptado de Del Toro (1994).

No item **a** da Figura 17, a bobina aa' interpreta todas as bobinas contidas na fase “a” ao par de polos, de forma semelhante à bobina bb' para a fase “b” e cc' para a fase “c”. Quando conectada uma das extremidades das bobinas entre si, o envolvimento das bobinas com o estator trifásico é denominado como conexão em Y, onde são induzidas tensões em cada uma das fases defasadas em 120° elétricos ao deslocamento de tempo t e 60° entre cada bobina. Ao ser aplicada uma tensão trifásica nas bobinas do estator do motor, é originado um campo magnético girante ao qual induz uma força eletromotriz no enrolamento do rotor, fazendo assim circular uma corrente na armadura do estator, produzindo o torque eletromagnético.

O torque eletromagnético e a tensão induzida são fundamentais para o processo de conversão eletromecânica. Ao ser aplicada uma tensão alternada nos enrolamentos do estator, um campo magnético variante no tempo irá surgir a uma velocidade proporcional à frequência da fonte alternada trifásica. A Lei de Faraday revela que a força eletromotriz induzida a uma espira é igual à taxa do fluxo magnético dessa espira, portanto, o fluxo magnético girante no estator induz tensão alternada no enrolamento trifásico do rotor. Essa tensão induzida provocará a circulação de corrente através do enrolamento do rotor, produzindo um fluxo magnético no rotor que tenderá a alinhar-se ao campo magnético circular do estator. (MARQUES; SAMBAQUI; DUARTE, 2013).

Para gerar um torque de partida e, em seguida, de movimento, uma corrente deve fluir pelo enrolamento do rotor. Dessa forma, a força eletromotriz induzida pela tensão eficaz por fase do enrolamento de armadura do estator pode gerar uma corrente eficaz induzida por fase na armadura do estator, para circular entre o rotor e produzir torque de partida, fazendo ter sentido de rotação na direção do campo girante. (BARBOSA, 2013b; DEL TORO, 1994).

A velocidade do rotor, denominada velocidade síncrona, é proporcional à frequência aplicada ao estator e ao número de polos de enrolamento do mesmo (equação 2.14). No

entanto, devido às características por perdas mecânicas, elétricas, magnéticas e parasitas no motor, a velocidade real do rotor sempre será menor que a velocidade de sincronismo, fator pelo qual no rotor ocorre um escorregamento em relação ao campo girante do estator, como verificado na equação 2.14 e 2.15.

$$n_s = \frac{120 \cdot f_1 \cdot (1 - s)}{p} \quad [rpm] \quad (2.14)$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad [rpm] \quad (2.15)$$

Onde, n_s representa a velocidade síncrona, p , o número de polos, f_1 , a frequência de alimentação da fonte aplicada ao estator, n , a velocidade real do eixo rotor, e s , o escorregamento, obtendo valores entre zero a uma unidade respectiva.

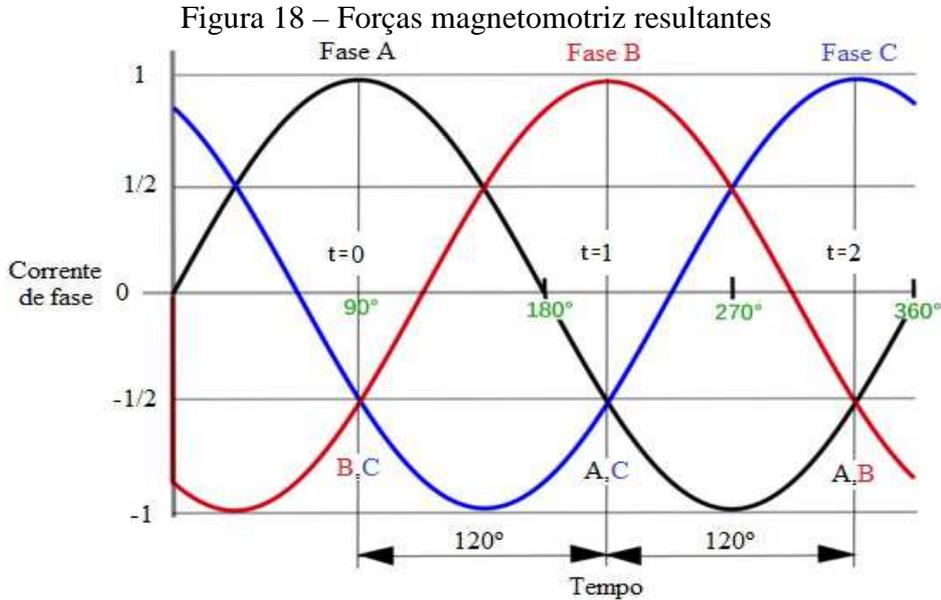
A força magnetomotriz ao campo girante é produzida pelas correntes de deslocamento no tempo proveniente do enrolamento de fase. (PINHEIRO, 2007).

No tempo t_1 do item **b** da Figura 17, a corrente de fase I_a se encontra no seu valor positivo máximo, e as demais, I_b e I_c , na metade de sua amplitude negativa. Assim, a força magnetomotriz produzida em I_a é máxima, produzindo um fluxo senoidal com amplitude máxima no eixo da fase I_a . (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; KUSKO, 1975). A fase I_b , inicialmente negativa em relação à fase I_a , é impulsionada para a parte superior no decorrer do fluxo, e o valor de seu módulo representa metade do seu valor máximo. De forma semelhante à fase I_c , possui a mesma característica.

Sendo a força magnetomotriz dependente da corrente que passa na bobina em um determinado instante de tempo, o campo magnético será máximo quando a corrente fluxo for máxima, mas quando a corrente for nula não haverá campo magnético.

Se as bobinas estiverem defasadas em 120° elétricos significa que a corrente na bobina B está atrasada $1/3$ do seu período em relação à bobina A , e a corrente na bobina C $1/3$ atrasada em relação à bobina B . Dessa forma, irá surgir uma força magnetomotriz única entre as três bobinas, e o sentido de rotação terá sentido horário ou anti-horário, dependente da ordem das fases ligadas ao motor.

A Figura 18, a seguir, representa a força magnetomotriz girante no estator provocada pelas três correntes defasadas em 120° elétricos decorrentes no tempo.



Fonte: NRCAN (2015).

A potência nominal do motor elétrico é definida pelo conjugado requerido pela carga e a rotação definida para a carga em condições nominais, mas estando a carga diretamente acoplada ao eixo do motor, o conjugado requerido é igual ao conjugado nominal. Nessa condição, a potência nominal do motor elétrico pode ser definida através da equação 2.16. (WEG, 2016).

$$P_n = 2 \cdot \pi \cdot n_N \cdot C_n \quad [kW] \quad (2.16)$$

Onde, P_n representa a potência nominal do motor em watts, C_n , o conjugado nominal do motor em N.m, e n_N , a rotação nominal do motor em rps.

O torque ou conjugado nominal (C_n) está relacionado ao produto da potência mecânica de saída (P_s), pela constante de equivalência (k) dependente da unidade utilizada, e à velocidade do eixo do motor, podendo ser expresso através da equação 2.17. (WEG, 2015; PROCEL *et al.*, 2009).

$$C_n = \frac{P_s \cdot k}{n_N} \quad [N.m] \quad (2.17)$$

O Quadro 3, a seguir, apresenta os valores da constante de equivalência k de acordo com as unidades de potência de saída e conjugado nominal.

Quadro 3 – Constantes de equivalências pelas respectivas unidades

Potência (P_s)	Torque (C)	Constante de equivalência (k)
Cv	Kgfm	716
Cv	N.m	7023
kW	N.m	9542
kW	Kgfm	973
W	N.m	9,54

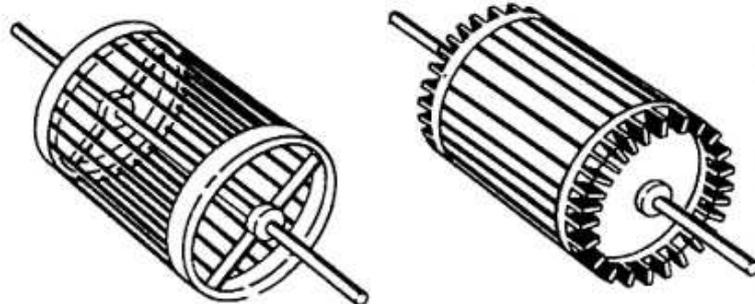
Fonte: PROCEL *et al.* (2009).

O motor de indução trifásico, quando apresenta sua forma construtiva básica em estator e rotor, é classificado de acordo com suas características construtivas do rotor, sendo rotor em gaiola de esquilo e rotor bobinado. (REZEK, 2011; PROCEL *et al.*, 2009).

O motor do tipo rotor de gaiola de esquilo apresenta aspectos construtivos simplificados, geralmente com o enrolamento primário no estator e o enrolamento secundário no rotor curto-circuitado. Esse motor apresenta menor custo de aquisição comercial, baixo custo de manutenção e alto torque de partida.

A Figura 19, a seguir, apresenta a característica das barras do rotor de gaiola.

Figura 19 – Rotor tipo gaiola



Fonte: Pacontrol (2014).

O rendimento expressa a eficiência na qual é realizada a conversão de energia elétrica absorvida da fonte em energia mecânica disponível ao eixo do motor, denominada potência nominal e expressa em Watt (W). Essa pode coexistir em HP (*Horse Power*) ou CV (Cavalo

Vapor), tendo como principal variável a corrente no motor, que pode ser determinada pela equação 2.18. (SIEMENS, 2006).

$$I_N = \frac{HP \cdot 746}{\sqrt{3} \cdot V_F \cdot FP \cdot \eta} \text{ ou } I_N = \frac{HP \cdot 736}{\sqrt{3} \cdot V_F \cdot FP \cdot \eta} \text{ [A]} \quad (2.18)$$

Onde, V_F refere-se à tensão entre fases, FP , fator de potência, η , rendimento, $\sqrt{3}$, constante para motor trifásico, e I_N , corrente nominal de consumo por fase no motor.

Ao considerar que a tensão de alimentação nos equipamentos elétricos é dada pelo valor de fase, que corresponde à magnitude de tensão capaz de produzir potência ao motor elétrico, se torna necessário encontrar o valor de tensão de pico (V_{pico}) dado pela equação 2.19.

$$V_{pico} = \sqrt{2} \cdot V_F \quad (2.19)$$

O controle de velocidade sob condições de carga nos motores de indução trifásicos tipo gaiola pode ser dado de diversas formas, através da variação do número de polos, variação de frequência, variação de tensão de alimentação e pela variação de tensão e da frequência de alimentação exercida no estator. (ALVES, 2003; DEL TORO, 1994).

Ao alterar o número de polos, torna-se possível agrupar os enrolamentos do estator de forma apropriada para cada fase de modo simétrico à circulação de corrente, mas ao ser escolhida uma velocidade, não é possível exercer um controle sobre ela. Ao alterar a frequência de alimentação por uma fonte de frequência variável, a velocidade síncrona também pode ser alterada, permitindo um controle satisfatório através de um inversor de frequência.

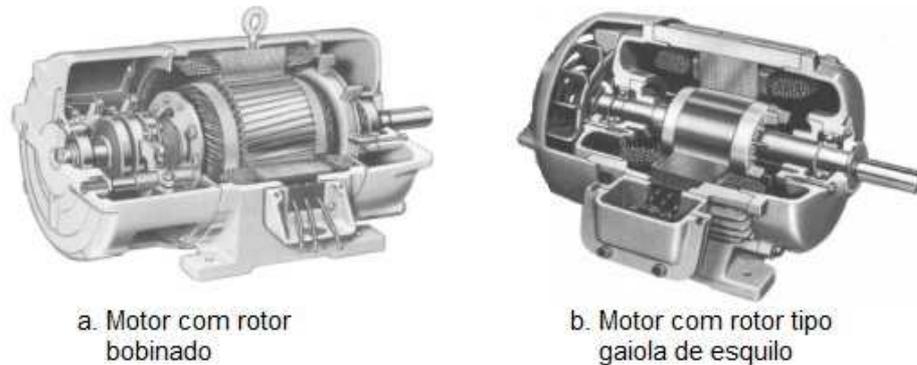
O controle de velocidade realizado pela variação de tensão ocorre devido à redução de tensão aplicada, realizada por autotransformadores ou conversores eletrônicos de potência. O controle de velocidade realizado pela variação de tensão e frequência de alimentação pode ser possível através de conversores eletrônicos de potência, controlando a tensão e frequência de alimentação de forma simultânea.

O motor do tipo rotor bobinado difere-se do motor de gaiola apenas pela característica construtiva do rotor, constituído em um núcleo ferromagnético laminado trifásico, podendo as bobinas estarem dispostas em uma configuração em “Y” ou “ Δ ”, sendo os terminais de cada

uma das bobinas conectadas aos anéis coletores deslizantes fixados ao eixo do motor. (SOUZA, 2001).

A Figura 20, a seguir, ilustra o motor de indução trifásico, sendo exemplificado o motor com rotor bobinado no item **a** e o motor com rotor tipo gaiola de esquilo no item **b**.

Figura 20 – Motor de indução trifásico



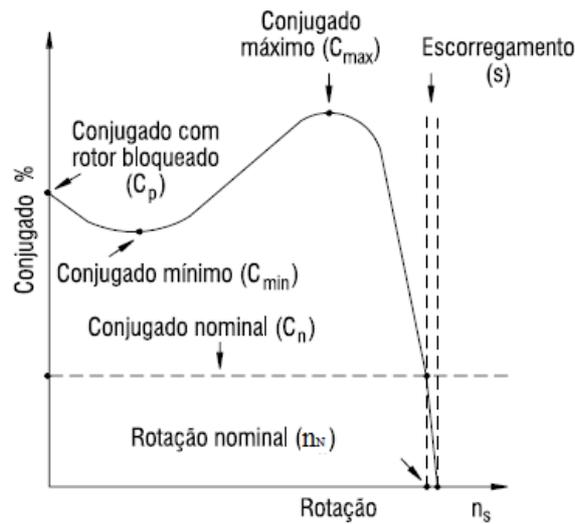
Fonte: Adaptado de Barbosa (2013).

O tempo de aceleração em motores elétricos pode ser definido pelo tempo em que o motor possa levar para sair da condição de repouso até o momento de atingir a velocidade nominal, podendo estar acoplado a uma determinada carga, o que define as características de desempenho específicas de cada motor em função do número de polos, frequência de acionamento e escorregamento.

O tempo de aceleração pode ser demonstrado através do método de integração gráfica ou pelo método dos conjugados médios, que pode ser determinado através de informações de catálogos técnicos pelos fabricantes de motores elétricos. Os dados de tempo de aceleração atribuídos a esta dissertação são baseados nos conjugados médios fornecidos em catálogos técnicos de fabricantes.

A Figura 21, a seguir, representa a curva característica da variação do conjugado pela rotação do motor.

Figura 21 – Curva característica conjugado x rotação



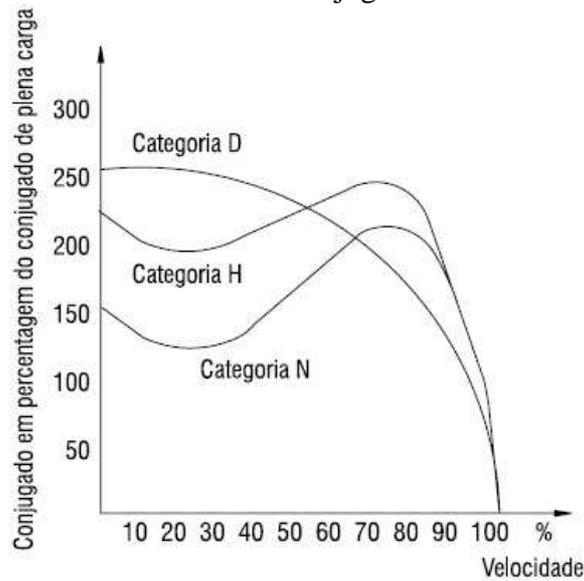
Fonte: WEG (2015); VOGES (2015).

Os valores representativos dos conjugados referentes aos pontos em destaque na Figura 21 são especificados conforme as normas NBR-17094 e IEC-60034-1 e são representados como:

- C_0 , conjugado básico: torque definido em função da potência e velocidade síncrona.
- C_n , conjugado nominal: torque desenvolvido através da condição nominal do motor sob tensão e frequência nominal.
- C_p , conjugado com rotor bloqueado: condição mínima de torque desenvolvido para a partida, independentemente da posição angular do rotor sobre a condição de tensão e frequência nominal.
- C_{min} , conjugado mínimo: torque mínimo desenvolvido pelo motor do início da aceleração à velocidade correspondente ao torque máximo.
- C_{max} , conjugado máximo: é o maior torque desenvolvido pelo motor sobre condição de tensão e frequência nominais.

As normas NBR-17094 e IEC-60034-1 definem em categorias os valores mínimos dos conjugados para a relação de velocidade e corrente de partida para os motores trifásicos de indução tipo gaiola de esquilo, sendo as categorias representadas conforme Figura 22, a seguir.

Figura 22 – Características das curvas de conjugado das diferentes categorias



Fonte: WEG (2015); VOGES (2015).

A curva de categoria D apresenta um conjugado de partida alto com característica de corrente nominal e alto escorregamento. Os motores que possuem esse tipo de comportamento são utilizados onde a carga apresenta picos periódicos. (WEG, 2015; VOGES, 2015).

Na curva de conjugado da categoria H, estão os motores que apresentam alto conjugado de partida em condições de corrente nominais e baixo escorregamento, que são aplicados em cargas onde exigem maior conjugado de partida. A maioria dos motores aplicados à indústria é da categoria N e apresenta conjugado de partida e corrente de partida normal com baixo escorregamento.

Com base na curva da Figura 21 de conjugado/rotação e de acordo com o comportamento característico da curva de conjugado de cada modelo de motor na Figura 22, o conjugado médio de motores das categorias H e N pode ser determinado de acordo com a equação 2.20.

$$C_{mméd} = 0,45 \cdot \left(\frac{C_P}{C_n} + \frac{C_{máx}}{C_n} \right) \cdot C_n \cdot g \quad [N.m] \quad (2.20)$$

Onde, $C_{mméd}$ refere-se ao conjugado médio do motor, e 0,45, constante de equivalência para motores das categorias H e N.

O conjugado resistente médio (C_{med}) é importante para o tempo de aceleração, que pode ser definido através da equação 2.21.

$$C_{med} = Fx \cdot rd \cdot i_g \quad [N.m] \quad (2.21)$$

O momento de inércia do motor juntamente com o da carga apresentam características fundamentais para a aplicação do motor, pois ambos afetam o tempo de aceleração do motor por apresentar resistência de movimento de rotação. O momento de inércia da carga atribuída ao projeto pode ser definido na equação 2.22.

$$J_t = \left(\frac{1}{2} (m \cdot rd^2) \cdot \left(\frac{n_N}{n} \right)^2 \cdot i_g \right) + J_m \quad [kgm^2] \quad (2.22)$$

Onde, n é a rotação no eixo da carga, J_m é o momento de inércia no eixo do motor e J_t é o momento de inércia total aplicado ao motor. O momento de inércia é dependente das características construtivas do motor elétrico. No entanto, seu valor é fornecido pelo fabricante em catálogos técnicos.

O desempenho do motor elétrico é determinado pelo tempo de aceleração (t_a). A equação 2.23 determina o tempo de aceleração que o motor elétrico poderia levar para sair de sua condição de repouso até atingir a velocidade de conjugado máximo.

$$t_a = 2 \cdot \pi \cdot n_N \left(\frac{J_t}{C_{mméd} - C_{med}} \right) \quad [s] \quad (2.23)$$

Essa condição somente pode ser válida se t_a for inferior a 80% do tempo de rotor bloqueado (trb), o tempo de rotor bloqueado depende das características construtivas do motor elétrico e permite definir a temperatura limite do enrolamento do motor quando percorrido por uma corrente elétrica durante a partida. Pode ser fornecido através de dados técnicos do fabricante.

2.5.2 Fonte de energia

Os veículos impulsionados por motores elétricos caracterizam-se por uma alta eficiência energética, baixo ou inexistente nível de emissões de poluentes e ruídos, tendo a energia elétrica como principal fonte de energia.

De acordo com o Instituto Nacional de Eficiência Energética – INEE (2010) e a Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE) (2016), os veículos elétricos podem ser classificados em cinco grupos conforme a forma da energia elétrica é disponibilizada:

- Veículo Elétrico a Bateria (VEB).
- Veículo Elétrico Híbrido (VEH).
- Veículo Elétrico a Célula de Combustível (VECC).
- Veículo Elétrico ligado à rede.
- Veículo Elétrico Solar (VES).

Conforme a Confederação Nacional do Transporte – CNT (2016), para o VEB, a energia provém de um conjunto de baterias que podem ser recarregáveis a uma rede elétrica ou uma fonte auxiliar externa ao veículo. No entanto, as baterias são responsáveis por grande parte do custo para veículos elétricos, assim quanto mais se deseja a eficiência para o veículo, maior se torna seu custo.

As baterias podem ser definidas como um acumulador de energia de corrente contínua capaz de transformar energia química em energia elétrica ou vice-versa. As baterias podem ser classificadas como células primárias ou secundárias. (FOWLER, 2013). As células primárias são acumuladores de energia que não podem ser recarregáveis após sua utilização, sua energia é produzida a partir de uma reação eletroquímica irreversível. (CHAGAS, 2007; FOWLER, 2013). As células secundárias são acumuladores de energia que apresentam características que podem ser recarregáveis por várias vezes, suportando muitos ciclos de carregamento. As baterias de chumbo-ácido são as mais conhecidas e podem ser facilmente recicladas.

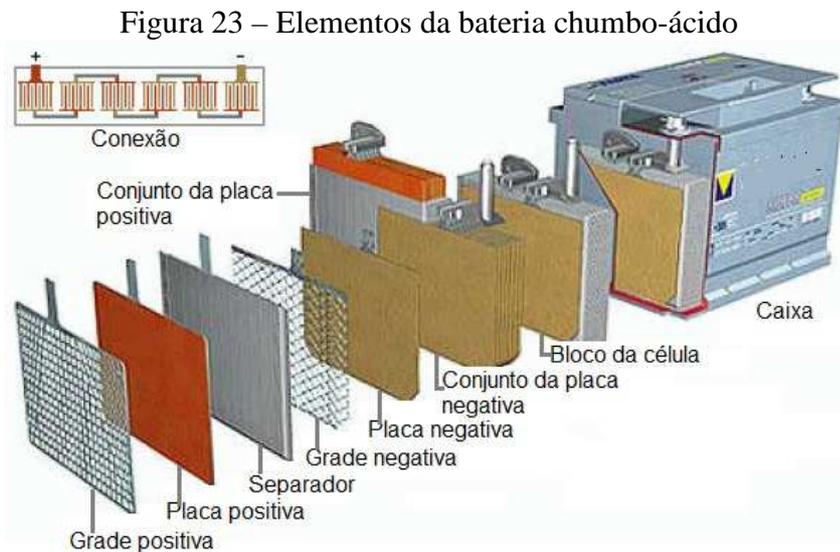
A bateria de células secundárias recarregável apresenta materiais ativos como chumbo (Pb), para as placas negativas, e óxido de chumbo (PbO₂), para as placas positivas, submersas a ácido sulfúrico (H₂SO₄) como eletrólito e recipiente, fornecendo ao veículo uma tensão nominal de doze volts (12 V). (BARROS; CASTRO; VEIGA, 2013; BOSCH, 2005; CHAGAS, 2007).

As baterias de chumbo-ácido são mais utilizadas em veículos e são responsáveis por alimentar os sistemas elétricos e eletrônicos. Quando em descarga, tendem a formar sulfato de

chumbo ($PbSO_4$), e em processo de recarga, que pode ser por um gerador impulsionado pelo motor de combustão interna, os materiais ativos são revertidos, como mostra a expressão global 2.1.



No Brasil, a produção de baterias automotivas concentra-se em baterias de chumbo-ácido, tendo como principais fabricantes a empresa brasileira Moura e a empresa norte-americana Johnson Controls. (BARROS; CASTRO; VEIGA, 2013). A Figura 23, a seguir, apresenta os elementos de construção da bateria do tipo chumbo-ácido.



Fonte: Johnson Controls (2008).

As baterias de chumbo-ácido são compostas por células, sendo que cada uma delas prevê tensão nominal de 2,1 volts e tensão mínima de segurança para evitar sulfatação de 1,8 V, com referência à temperatura de 25 °C. Dessa forma, as baterias automotivas, para obterem uma tensão nominal de 12 V, precisam associar 6 células em série. (JOHNSON CONTROLS, 2008). O número de elementos necessários conectados em série para obter tensão de alimentação do consumidor pode ser determinado pela equação 2.24, utilizando-se das tolerâncias de +10% e -15% da faixa de tensão nominal. (IEEE, 2010).

$$N_{(células)} = \frac{Tensão_do_consumidor}{Tensão_final_elemento} \quad (2.24)$$

A capacidade nominal da bateria é dada pela taxa de descarga do consumo de corrente elétrica no decorrer do tempo em horas, em que seu consumo é representado em amperes-hora (Ah), como representado na equação 2.25.

$$C = \int_0^t I_c dt \quad [Ah] \quad (2.25)$$

Onde, C é a capacidade nominal da bateria em Ah, I_c é a corrente de consumo em amperes da carga durante o tempo de descarga e t é o tempo em horas.

Em baterias de chumbo-ácido, as especificações de regime de descarga são dadas em 5, 10 e 20 horas, o que equivale a taxas de descargas de 0,2, 0,1 e 0,05 da capacidade declarada. Na equação 2.26, é determinado o volume necessário de células conectadas em paralelo, denominado *string*, para atender às especificações de capacidade nominal da bateria para uma carga nominal.

$$N_{(string)} = \frac{I_c}{I_N} \quad (2.26)$$

O valor é calculado a partir da corrente máxima de consumo I_c da equação 2.25 pela corrente nominal da carga I_N da equação 2.18.

Cada *string* pode fornecer uma corrente média de consumo, conforme a equação 2.27. Assim, a corrente do *string* é definida a partir da corrente máxima solicitada na equação 2.25 e pelo número de *string* na equação 2.26.

$$String = \frac{I_c}{N_{(string)}} \quad [A] \quad (2.27)$$

A capacidade de energia (E_F) da fonte ao sistema de propulsão pode ser definida através da equação 2.28.

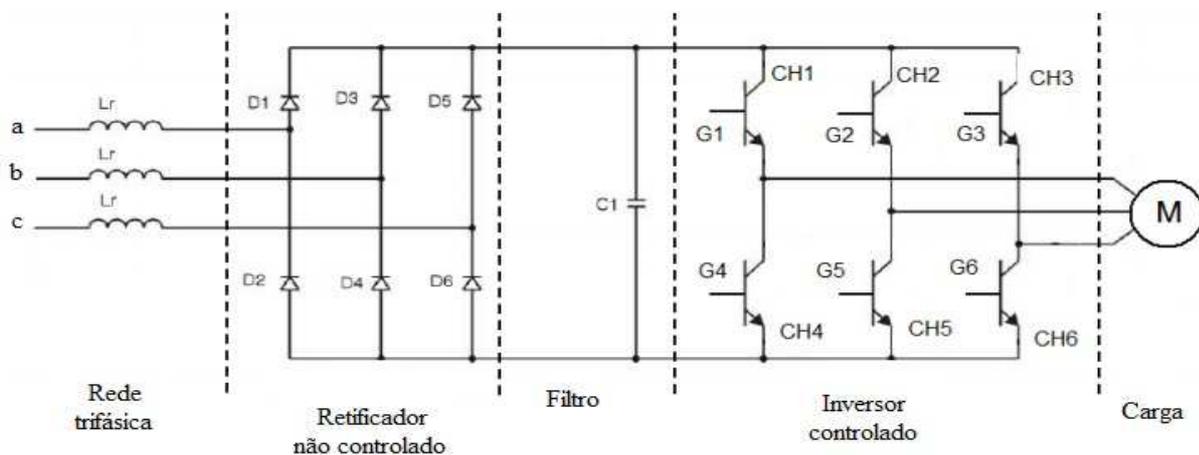
$$E_F = V_{pico} \cdot I_N \quad [W.h] \quad (2.28)$$

2.6 Conversor eletrônico de potência

Os conversores eletrônicos de potência realizam a conversão de tensão elétrica de uma fonte de energia em corrente contínua para uma carga em corrente alternada ou de uma fonte de corrente alternada para uma carga de corrente contínua. No veículo elétrico, a conversão é realizada de corrente contínua para corrente alternada através de conversores chamados de inversores de frequência. Seu propósito é controlar a rotação e o torque do propulsor elétrico do veículo. (ARRABAÇA; GIMENES, 2011).

O inversor, através da alimentação de uma fonte de energia com frequência padrão na rede elétrica, fornece a carga de alimentação elétrica de forma ajustável, sendo possível controlar a tensão, a corrente elétrica e a frequência. Dessa forma, pode-se ajustar a velocidade e o torque de motores elétricos. Apesar de serem muitas as características dos inversores de frequência, o fator determinante é dado pelos blocos constituintes destacados na Figura 24, a seguir. (LEÃO; OLIVEIRA; RODRIGUES, 2003).

Figura 24 – Diagrama de inversor de frequência



Fonte: Leão, Oliveira e Rodrigues (2003).

No retificador de onda completa, são convertidas as tensões alternadas da rede trifásica de entrada em tensões retificadas ao passar pelo conjunto de diodos retificadores; já as tensões retificadas são transformadas em uma tensão contínua após passar pelo bloco do filtro, também denominado link CC. Em alguns modelos, o link CC pode ser acessado através de seus terminais após o filtro. Nesses inversores, existe a possibilidade de fazer uso de uma fonte de CC, podendo ser por um banco de baterias nesse estágio, em que pode ser desprezado o bloco de retificação, assim se torna possível utilizar os inversores industriais em veículos elétricos.

No bloco do inversor controlado, as tensões trifásicas alternadas são reconstruídas. No entanto, podem não possuir a mesma magnitude e frequência da fonte de alimentação, o que o torna um facilitador para utilizar em veículos elétricos.

Os fatores preponderantes na escolha para a especificação adequada de um modelo comercial de inversor de frequência são a potência e a tensão de trabalho. Entretanto, características de corrente nominal da carga, tipo de acionamento, tempo de aceleração e desaceleração, sistema de controle, velocidades máximas e mínimas e sinais de entrada/saída digitais e analógicos são fatores fundamentais que devem ser levados em consideração. (WEG, 2004).

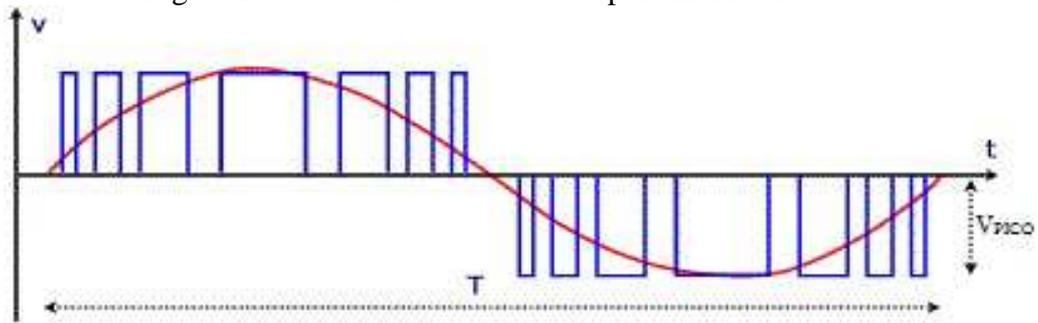
Atualmente, inversores de frequência utilizam o controle de velocidade por estratégia de modulação por largura de pulsos (PWM), com isso permite gerar ondas senoidais de frequência variável com resolução de até 0,01 Hz.

Em aplicações que exijam uma alta performance dinâmica, precisão de controle de velocidade, respostas rápidas e respostas dinâmicas suaves em baixa velocidade, torna-se necessário um método de controle vetorial para o funcionamento do inversor de frequência, o que permite um controle preciso de torque para sua faixa de operação exigida para a aplicação em um projeto. No entanto, em sistemas em que são necessários controle de torque e velocidade, deve ser acoplado um taco gerador de pulsos (encoder) ao controle vetorial para obter melhores funções dinâmicas dos propulsores em alta frequência, pois é capaz de controlar as componentes de velocidade e o torque do motor elétrico.

O inversor de frequência de modo vetorial tem seu controle através de seu sistema de entrada e saída de dados composto por dispositivos responsáveis pela interligação homem-máquina, em que o homem pode inserir informações na máquina ou mesmo a máquina pode fornecer informações ao homem.

As entradas e saídas analógicas conseguem controlar/monitorar o inversor através de sinais eletrônicos analógicos, podendo o sinal estar operando em modo de corrente contínua na forma de tensão de 0 a 10V ou em corrente elétrica de 0 a 20 mA ou mesmo de 4 a 20 mA. Dessa forma, é possível permitir o controle de rotação do motor elétrico, como forma de entrada, e leituras de rotação ou corrente como forma de saída. Já as entradas e saídas digitais conseguem controlar/monitorar o inversor através de sinais eletrônicos discretos (digitais), em que pode o sinal operar em forma de chave liga/desliga, permitindo o controle de funções mais básicas como a seleção do sentido de rotação, bloqueio, seleção de velocidade e outras. A Figura 25, a seguir, ilustra o controle de velocidade ao motor elétrico por sinal PWM.

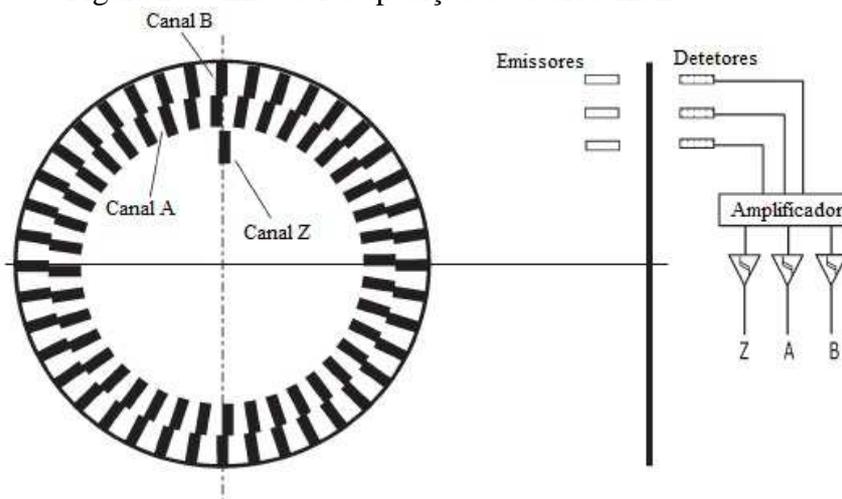
Figura 25 – Controle de velocidade por sinal PWM



Fonte: WEG (2004).

A Figura 26, a seguir, apresenta o encoder que tem a função de fornecer informação de deslocamento de posição do eixo do rotor no motor elétrico.

Figura 26 – Encoder de posição de deslocamento



Fonte: WEG (2004).

Os encoders são dispositivos utilizados para referenciar a posição angular e velocidade, podem ser fabricados em um disco de metal impresso em uma trilha com segmentos codificados que forneçam informação discreta de deslocamento. Dois pares emissor/detector, canal A e B, estão posicionados na forma que possam ser produzidos no detector dois sinais defasados em 90° , onde os sinais que são produzidos possam ser processados por um circuito eletrônico que obtém a informação de sentido de rotação.

2.7 Método para projetos

Há diversos métodos para o desenvolvimento de um produto e/ou serviço. Embora apresentem características diferentes, a metodologia para um projeto apresenta um detalhamento ou explicação exata da ação desenvolvida de forma comum a todos os métodos, a fim de conceber uma organização da produção do projeto com bases racionais para seu desenvolvimento. (CROSS, 2000).

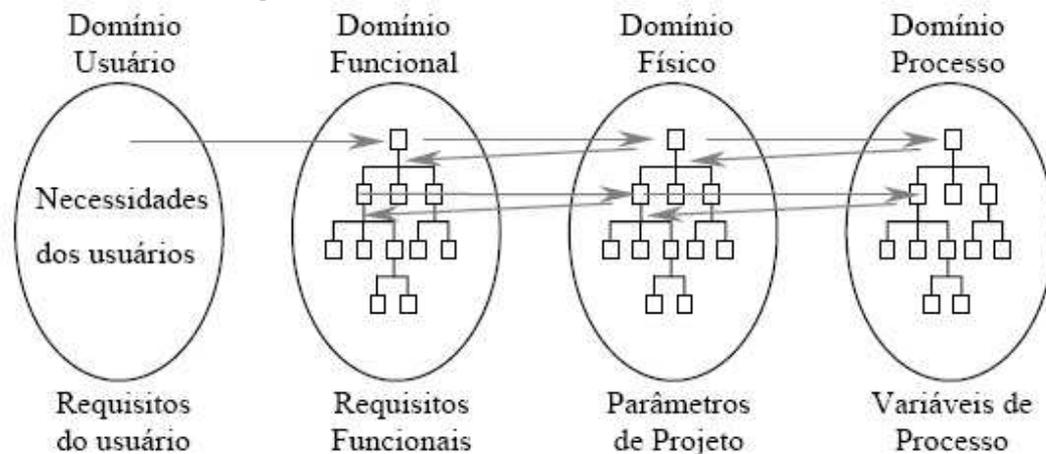
Os métodos axiomáticos para projetos, desenvolvidos pelo professor Nam Pyo Suh do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (*MIT*), são axiomas que apresentam um embasamento empírico através de premissas consideradas evidentes e verdadeiras, de forma que não podem ser deduzidas, como as leis de Newton e as leis da termodinâmica, que são consideradas axiomas, definindo os conceitos de energia, entropia e força. (SUH, 1990).

A metodologia constitui-se em uma análise sistemática matricial das necessidades de clientes, por isso busca-se transformá-las em requisitos funcionais com o objetivo de satisfazê-los de forma mais simples possível. Na abordagem axiomática, devem ser aplicados quatro conceitos que definem as atividades e regras a serem seguidas no projeto: domínio, hierarquia, *zig zag* e axiomas do projeto.

O conceito de domínio está relacionado com a abordagem no decorrer do processo do projeto, em que o produto/serviço que está sendo considerado é relacionado ao domínio do usuário (*CAs – Customer Attributes*), atribuindo as necessidades e os requisitos dos clientes para poder descrever o problema para o projeto. O domínio funcional (*RFs – Functional Requirements*) representa as especificações das ações a serem realizadas no projeto para atender aos usuários, dentre as limitações impostas. O domínio físico (*DPs – Design Parameters*) define os parâmetros do projeto que atendem aos *RFs*. O domínio do processo (*PVs – Process Variables*) representa as variáveis do processo que cumprem as necessidades dos *DPs*. (CARNEVALLI, 2007; PARK, 2007). Os domínios ao método axiomático são ilustrados na Figura 27, a seguir.

Os domínios que pertencem ao projeto são constantes, no entanto os elementos pertencentes a cada domínio podem ser alterados. O mapeamento matricial do projeto ocorre na relação de dependência da abordagem axiomática, que é realizada na mudança dos processos entre os domínios. (GEBALA; SUH, 1992).

Figura 27 – Domínios de métodos axiomáticos



Fonte: Sozo (2002).

A mudança ocorre em cada par de domínio adjacente da esquerda para a direita associado a cada elemento entre os domínios do projeto. O domínio da esquerda representa a necessidade, “o que deseja alcançar em cada requisito dos elementos indicados”, e o domínio da direita, a solução de “como pretende alcançar a solução de cada requisito dos elementos do domínio da esquerda”. Na concepção de cada elemento, é realizado o questionamento de “por que pretende alcançar a solução para cada requisito”. O mapeamento entre os domínios do projeto e a resultante da abordagem axiomática nos requisitos de sair do “que” para “como” auxilia os requisitos do projeto. (SISL, 2008).

A classificação de projetos, embora estes apresentem tarefas distintas, pode ser representada em termos dos domínios da abordagem axiomática, conforme apresenta o Quadro 4, a seguir. (SUH, 1995).

Quadro 4 – Domínios da abordagem axiomática e diferentes projetos

Área	Domínio usuário	Domínio funcional	Domínio físico	Domínio processo
Produtos	Necessidades desejadas pelos usuários	Requisitos funcionais específicos ao produto	Variáveis físicas que satisfaçam aos requisitos funcionais	Variáveis de processo que possam controlar o projeto
Materiais	Desempenho desejado	Propriedades requeridas	Microestrutura	Processos
Software	Necessidades desejadas do software	Saída	Algoritmo e variáveis de entrada	Sub-rotinas

Continua

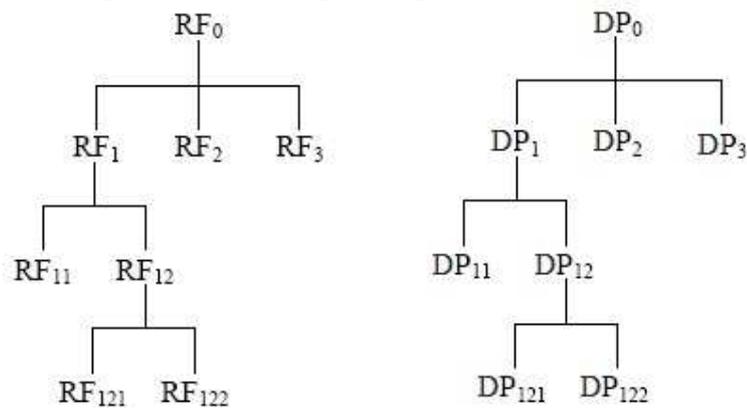
Conclusão

Área	Domínio usuário	Domínio funcional	Domínio físico	Domínio processo
Sistemas	Necessidades desejadas do sistema de forma geral	Requisitos funcionais para o sistema	Máquinas ou componentes, subcomponentes	Recursos (materiais, financeiro, humano etc.)
Organizações	Satisfação do cliente	Funções da organização	Áreas ou programas	Pessoas ou recursos que possam manter o programa

Fonte: Suh (1995).

A hierarquia no processo axiomático decompõe o problema em uma determinada estrutura hierárquica, podendo abstrair informações a um maior número de detalhamento nos requisitos funcionais e nos parâmetros do projeto. Na hierarquia, os elementos contidos nos domínios funcionais, físicos e de processos são elevados a informações de níveis mais detalhados de um sistema para subsistemas. A interação ocorre entre interligar os domínios em cada nível hierárquico, conforme apresenta a Figura 28, a seguir. (SUH, 1990).

Figura 28 – Hierarquia no processo axiomático

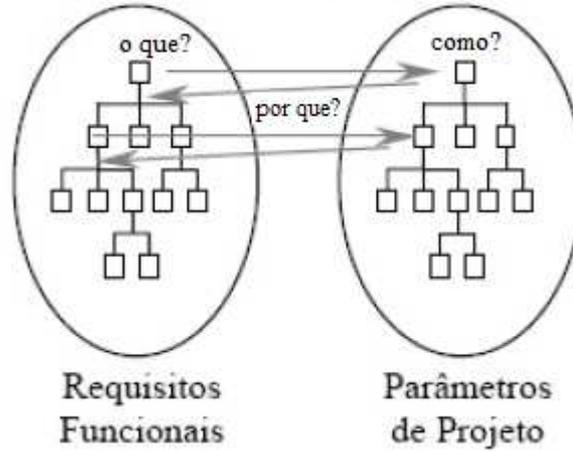


Fonte: Suh (1990).

O conceito de *zig zag* define as alterações que ocorrem entre os domínios com a decomposição dos elementos no projeto, realizando um processo de zigue-zague entre os domínios. O processo se inicia nos *RFs* para *DPs* de um único elemento, que é decomposto em vários subitens detalhados a níveis elevados em cada momento da hierarquia do projeto. (LEE; SUH; OH, 2001). Ainda no processo, cada *RF* deve ser atendido por um *DP* no mesmo nível de hierarquia, para somente assim ser detalhado em novos subitens e poder atingir uma

nova hierarquia, como é indicado na Figura 29, a seguir. Esse processo é orientado através dos axiomas da independência e da informação.

Figura 29 – Conceito de *zig zag* no processo axiomático



Fonte: Suh (2001).

O axioma de independência para o projeto indica que cada parâmetro do projeto no domínio físico deve atender somente a um requisito funcional, dessa forma pode manter-se a independência dos demais requisitos funcionais do projeto. O axioma de independência ou axioma 1 pode ser determinado através da relação entre os requisitos funcionais e parâmetros de projeto, conforme a equação 2.29.

$$\{FR\} = [A]\{DP\} \quad (2.29)$$

Onde, $\{FR\}$ é o vetor de requisitos funcionais, $\{DP\}$ é o vetor de parâmetros de projeto e $[A]$ é a matriz de projeto.

A matriz de projeto apresenta sua dimensão ($m \times n$) e mantém a relação entre os elementos dos vetores FR e DP , sendo que cada elemento contido na matriz A representa a alteração de um requisito funcional em função do parâmetro do projeto, como pode ser verificado na equação 2.30.

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & \dots & A_{2n} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & \dots & A_{3n} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & \dots & A_{4n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & A_{(m-1)n} \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{m(n-1)} & A_{mn} \end{bmatrix} \quad A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \quad (2.30)$$

Na solução do axioma de independência, podem existir três modelos de matrizes para a solução do projeto. O primeiro modelo, conforme a equação 2.31, indica que cada parâmetro do projeto é utilizado para satisfazer a um único elemento do requisito funcional, a fim de manter a completa independência no axioma 1. Essa solução é dita como “desacoplada”, visto que um ajuste no parâmetro do projeto não causará alterações a outros requisitos funcionais, sendo considerado o melhor tipo de solução para o projeto.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (2.31)$$

O segundo modelo apresenta um modelo mais comum para solução de um projeto, chamado solução “semiacoplada”, em que um elemento do requisito funcional pode ser satisfeito por mais parâmetros de projeto. A matriz de solução do projeto se apresenta como triangular inferior, indicando a ordem para a qual os parâmetros de projeto devem ser realizados. A equação 2.32 apresenta uma solução aceitável ao axioma 1.

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (2.32)$$

No terceiro modelo, uma matriz de projeto é dita como “acoplada” quando os parâmetros do projeto não somente estão relacionados ao elemento do requisito funcional de domínio na sua hierarquia, mas também com elementos que estão acima e abaixo do elemento principal na matriz, como indicado na equação 2.33. Na equação, os parâmetros de projeto DP_1 , DP_2 e DP_3 satisfazem aos requisitos funcionais FR_1 , FR_2 e FR_3 , situação esta que deve ser evitada, pois uma alteração em FR_1 indicará alteração em DP_1 e pode influenciar FR_2 ou FR_3 , podendo ocorrer alteração também em DP_2 e DP_3 .

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} \\ A_{21} & A_{22} & A_{32} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (2.33)$$

O axioma de informação ou axioma 2 indica que uma solução desacoplada de projeto, a qual possui um teor mínimo de informação, apresenta a melhor solução de projeto para um problema proposto. Dessa forma, podem ser reduzidos o nível de complexidade do projeto e a forma como as informações podem se relacionar. (LEE, 2003; CARNEVALLI, 2007).

De forma complementar ao axioma 1 para definir quais as possíveis soluções ao problema proposto, o axioma 2 é utilizado para selecionar a melhor alternativa com base no teor mínimo de informação. A informação é determinada na probabilidade de um parâmetro do projeto satisfazer um elemento do requisito funcional, podendo ser quantificado através da equação 2.34.

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{p_L} \right) \quad (2.34)$$

Onde, I representa o conteúdo da informação e p_L considera a probabilidade de satisfazer aos requisitos funcionais. A equação é aplicada a cada elemento de um requisito funcional, onde o menor valor representa o teor mínimo da informação na solução, e não pode ser aplicada em projetos acoplados devido à dependência de cada elemento ao requisito.

A informação pode ser definida como uma medida necessária de conhecimento para atender a um dado elemento de requisito em determinado nível de hierarquia dos requisitos funcionais. Dessa forma, quanto maior o nível de informação essencial para atender aos requisitos funcionais, maior será a complexidade de implementação do projeto para o sucesso. (LEE, 2003).

Dentre as possíveis soluções a um projeto desacoplado, somente pode ser possível definir a melhor solução através da utilização dos dois axiomas, pois os axiomas 1 e 2 são complementares. Devido às afirmações deduzidas ou admitidas e proposições a serem demonstradas, surgem corolários e teoremas que orientam na concepção de parâmetros de projeto para os cumprimentos dos axiomas.

3 ESTADO DA ARTE

A engenharia tem como principal função gerar produtos e/ou serviços inovadores com objetivo de resolver problemas da sociedade, contudo, em alguns casos, levou-se a sistemas complexos devido à dependência de requisitos funcionais. Dessa forma, buscaram-se alternativas para a construção de parâmetros baseados em teorias que levaram ao desenvolvimento de sistemas complexos, viabilizando baixo custo e prazos determinados de implementação. (SUH, 2012).

Em resumo, muitas pesquisas, direta ou indiretamente, buscam soluções para o desenvolvimento de veículos elétricos, contribuindo para o meio ambiente e melhor sustentabilidade. No entanto, de forma geral, essas pesquisas estão direcionadas às mesmas características de necessidades e critérios, podendo ser físicas ou funcionais, e aplicadas de forma comum nas mesmas variáveis do sistema de propulsão, como identificado no Quadro 5, a seguir.

Quadro 5 – Parâmetros comum de pesquisa

Necessidades	Crítérios	Variáveis
Potência	Aumentar a eficiência de controle Reduzir o consumo de energia Confiabilidade Conforto	Acionamento do sistema de propulsão
Torque	Desempenho Sistemas compactos	Propulsor
Velocidade	Simplicidade Segurança Autonomia Baixo custo Sistemas robustos	Sistema de armazenamento de energia Controladores

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Nesta seção, são apresentados os principais trabalhos relacionados ao desenvolvimento de veículos elétricos que podem relacionar os parâmetros de forma comum, conforme apresentado no Quadro 5.

Atualmente, o desenvolvimento do sistema de tração em veículos elétricos urbanos está voltado para o aumento na eficiência de controle, redução do consumo de energia, confiabilidade e conforto de trânsito. Estudos comparativos em motores de tração, indicam um aumento no uso de motores de corrente alternada para o sistema de tração, devido à adição no número de fases e chaveamento variável. (ILIE; PETRU; ESANU, 2012).

Os conversores de potência são desenvolvidos através de circuitos de comutação dos transistores bipolares de potência (*Insulated Porta Bipolar Transistor – IGBTs*), com sistemas digitais de controle para variação no controle de velocidade do motor de tração. Isso ocorre com a utilização de métodos de controle por orientação de campo, controle direto de torque ou fluxo, inteligência artificial, entre outros.

Ainda de acordo com Ilie, Petru e Esanu (2012), para aumentar a confiabilidade e reduzir custos, os motores assíncronos conectados diretamente às rodas e sendo controlados por orientação de campo ou controle de torque e fluxo apresentam tendências para projetos futuros nos sistemas de tração para veículos elétricos urbanos. Sistemas complexos devem ser subdivididos e modelados de forma desacoplada, permitindo uma visão multidisciplinar mais clara dos conjuntos que compõem o sistema. (BONATTO *et al.*, 2013).

Vários equipamentos e sistemas podem estar presentes na arquitetura de veículos elétricos urbanos. No entanto, os equipamentos são distribuídos entre os subsistemas de acionamento de propulsão, propulsor, subsistema de energia, controladores e circuito de comando de acordo com as especificações de projeto, objetivando assim proporcionar sistemas simples com baixo custo ou fatores de desempenho. Com vistas a proporcionar um sistema simples e de baixo custo, Bonatto *et al.* (2013), através de uma análise morfológica de equipamentos, utilizaram um sistema de propulsão conectado diretamente nas rodas por propulsores do tipo *brushless*, de corrente contínua de 51 polos e com alimentação de 48 volts de tensão em corrente contínua por uma bateria de lítio fosfato de ferro (LiFePO₄) de 12 Ah, no desenvolvimento para um veículo elétrico urbano com capacidade para um ocupante.

Os motores são acionados por um sistema trifásico de forma independente a cada motor, permitindo variações de comutações comandadas por um microcontrolador que recebe sinais da posição da direção, do acelerador e do nível de tensão das baterias. Esses sinais são processados e enviados ao módulo de controle dos motores.

A configuração do sistema conectada diretamente nas rodas do veículo pode proporcionar um sistema mais compacto, reduzindo peso agregado à massa do veículo, ao volume, à simplicidade mecânica e ao controle independente das rodas. Como desempenho, foi proporcionado 1002,55 W de potência máxima com torque binário de 29,19 N.m, velocidade de 328 rpm e rendimento de 77%, indicando resultados satisfatórios ao projeto. Alguns desafios como alta eficiência, robustez do sistema, dimensões, conforto, segurança, custos elevados, baixa autonomia da fonte de energia e restrições de pontos de recargas são obstáculos para tornarem populares os veículos elétricos.

Os motores elétricos, na maioria das aplicações industriais, o torque e a velocidade são utilizados em pontos de operações predefinidos. Entretanto, na aplicação para propulsão, são utilizados em toda a faixa de operação, dessa forma a observação do mapa de eficiência torna-se um método conveniente para determinar o propulsor em um veículo elétrico. (LUKIC; EMADO, 2003). Portanto, através de mapas de eficiência de motores elétricos podem ser avaliadas as melhores combinações de torque e velocidade específicas, com características mais eficientes para perdas mecânicas, de cobre e do núcleo de entreferro que possam prevalecer em determinadas regiões da curva de torque e velocidade no mapa de eficiência, tornando possível o desenvolvimento em um projeto mais eficiente.

No sistema de propulsão, o motor deve realizar paradas frequentes e alta taxa de aceleração e desaceleração, necessitando de densidade de torque e eficiência alta em toda a faixa de velocidade, precisão de controle para acionamento e bom desempenho em estado estacionário e transitório. Diante dessas características, um motor para a aplicação de propulsão pode apresentar desempenho diferente se comparado a aplicações industriais. Para a propulsão, o motor de indução tem proporcionado benefícios, como baixa manutenção e baixo peso agregado na massa total do veículo. Ademais, apresenta tecnologias conhecidas, características de manufatura amplamente disponíveis e menores custos de produção.

Os motores de indução podem funcionar em condições de baixa velocidade, limitada pela corrente, e em altas velocidades, sendo limitada pela tensão de alimentação. Em condições de frenagem regenerativa, o motor pode fornecer carga para sistema de armazenamento de energia, comportando-se como um gerador. A eficiência pode não ser o único parâmetro que o motor elétrico cumpre, no entanto, o mapa de eficiência permite um método para melhorar a escolha na concepção do comportamento do sistema de propulsão.

Com o objetivo de encontrar a melhor configuração para o sistema de propulsão, Silva *et al.* (2015), através do método de estratégia de gestão de energia baseado nas regras do estado de carga da bateria, torque máximo e torque requerido do motor elétrico, buscaram determinar a capacidade da bateria e a configuração do sistema de propulsão para o veículo elétrico. Esses autores ainda utilizaram o ciclo de condução padrão brasileiro urbano NBR-6601 para avaliar seis modelos distintos de configurações para propulsão que pudessem permitir acelerações e desacelerações rápidas, de acordo com o ciclo de condução. Dentre as configurações avaliadas, os melhores resultados foram uma configuração independente com motores conectados diretamente nas rodas no eixo dianteiro, com uma fonte de energia de 100 volts, e o motor conectado a um conjunto diferencial por engrenagens com uma fonte de energia de 48 volts no eixo traseiro.

Os motores do tipo sem escovas (*brushless*) de corrente contínua conectados diretamente nas rodas dianteiras apresentam uma baixa eficiência quando o veículo está em baixa velocidade. Portanto, o motor conectado ao eixo traseiro com a mesma eficiência e potência inferior é conectado ao conjunto diferencial para elevar a velocidade de operação do motor quando o veículo se encontra em baixa velocidade, transmitindo torque nas rodas.

Os inversores de frequência são equipamentos que estão associados aos fatores de desempenho que possam apresentar custos razoáveis para concepção do sistema de tração de veículos elétricos e híbridos. Os inversores trifásicos são responsáveis pelo processo de funcionamento dos motores de tração através da fonte de corrente contínua. No entanto, o motor elétrico pode se comportar como um motor de tração ou gerador, dessa forma o inversor de frequência pode comportar-se como retificador para conversão de energia em frenagem regenerativa. (YE; YANG; EMADI, 2012). Os requisitos de alta confiabilidade, baixo custo, alta densidade de potência e eficiência são fundamentais para contribuir no desempenho do inversor, assim como no desempenho geral do sistema na aplicação automotiva.

Dentre as possíveis topologias que podem ser aplicadas aos inversores de frequência para o sistema de tração estão os inversores de tensão, que são amplamente utilizados em veículos elétricos e híbridos. Seu uso deve-se à característica da fonte de tensão empregada nos veículos, sendo constituído por um sistema trifásico e um banco de capacitor para manter a fonte de energia de forma ideal. O barramento de corrente contínua pode ser alimentado direto pelo banco de baterias ou por um conversor síncrono bidirecional.

Ainda de acordo com Ye, Yang e Emadi (2012), os veículos elétricos apresentam características ideais para uso em grandes centros urbanos, isso devido à baixa emissão de poluentes no futuro. No entanto, eletrônica de potência, sistema de propulsão e sistema de armazenamento de energia com custos elevados apresentam os principais obstáculos para a comercialização em massa dos veículos.

Araujo (2011) apresenta, através de uma matriz de decisão baseada em requisitos como autonomia, aceleração, velocidade e carga máxima, um modelo de veículo urbano de dois lugares com propulsão elétrica. Nesse modelo, a configuração do trem de força se apresenta, conforme a Figura 16, item **f**, acoplado a dois motores do tipo “in-wheel”, de relutância variável, sendo alimentado por bateria de íon-lítio.

No entanto, tecnologias de propulsão, com relutância variável no Brasil, apresentam-se novas, com muitos modelos ainda em fase de testes. É importante ressaltar que as fontes de energia de baterias em íon-lítio não são fabricadas no Brasil. Lee, Kim e Ahn (2013)

apresentam um sistema de controle para controlar dois motores de propulsão *brush-less direct current* (BLDC) conectados nas rodas traseiras para E-Scooter.

O controle do inversor é linear e controlado por três sensores do tipo *Hall*, sendo a comutação realizada nas três fases da bobina do estator do motor de forma eletrônica, através de uma mesa de sequência senoidal com índices de 1020 ciclos elétricos. Quando o motor está em estado estacionário, o sensor *Hall* é utilizado para acioná-lo em modo convencional de duas fases, em seguida é alterado para comutação em três fases, conforme a velocidade do motor.

Xue, Cheng e Cheung (2008) realizaram uma investigação comparando eficiência, peso, custo, velocidade máxima, tolerância a falhas, segurança e confiabilidade em motores elétricos do tipo de relutância variável (*SRM*) e corrente contínua com escovas, motores de indução, ímãs permanentes e BLDC utilizados para tração em veículos elétricos, buscando uma melhor característica de propulsão.

O controle para o acionamento em motores de corrente contínua com escovas apresenta menores custos, no entanto aponta alto índice de manutenção e limites de velocidade máxima em função da comutação das escovas. Nos motores de indução, apesar da construção simples, confiabilidade, robustez e baixa manutenção por não apresentarem escovas de comutação, os custos com controladores são elevados. Segundo esses autores, os motores do tipo SRM apresentam vantagens em comparação com os demais tipos de motores. No que se refere a aspectos de arrefecimento, velocidade máxima, tolerância a falhas, segurança e confiabilidade, se apresentam com melhores características para aplicação em veículos elétricos, no entanto podem apresentar picos de torque e ruído acústico.

Diante de uma metodologia de investigação isolada de cada equipamento do sistema de transmissão e potência, perante as opções disponíveis da configuração do sistema de tração veicular, pode ser possível elaborar um quadro morfológico para obter a melhor escolha da configuração do sistema de tração para veículos elétricos e híbridos. (TANIKAWA *et al.*, 2010). O quadro morfológico consiste em um método que permite decompor um problema em estado global em problemas parciais ou parâmetros parciais, podendo ser esquematizado em forma de tabela, onde são apresentadas opções de alternativas para possíveis soluções do problema.

Embora cada equipamento tenda a realizar uma função essencial para o funcionamento do veículo, parâmetros técnicos e econômicos devem ser considerados para beneficiar a melhor solução para a configuração do sistema de transmissão, como; valor do veículo, custo

de energia, autonomia, torque e potência. Dessa forma, poderiam surgir alternativas na configuração do sistema que não alterariam a eficiência do conjunto de forma significativa.

De forma semelhante, Pupo (2012) utilizou a análise morfológica para descobrir possibilidades válidas na introdução de veículos elétricos no tráfego urbano. As variáveis são baseadas em argumentos que influenciam na escolha combinatória do modelo de veículo. No entanto, a grande quantidade de combinações apresenta uma característica de limitação para utilizar a análise morfológica, necessitando, muitas vezes, de auxílio de outros métodos para avaliação das possibilidades identificadas.

Uma abordagem realizada por Barbieri e Campatelli (2015), baseada na matriz de ponderação e em métodos axiomáticos, utiliza estratégia de avaliação multicritério para avaliar diferentes soluções de mobilidade elétrica para sustentabilidade em centros urbanos. Com o uso da árvore de decomposição de projetos axiomáticos e o axioma de informação, é dedicada uma série de parâmetros e pesos a eles para avaliar as diferentes tecnologias, obtendo como principais aspectos a redução de peso agregada à massa do veículo. No mercado brasileiro, os veículos elétricos e híbridos vêm crescendo a uma taxa expressiva, porém o número de unidades licenciadas ainda é muito baixo.

Com o objetivo de incentivar as vendas, o governo tem aplicado leis para isenção e redução de impostos sobre as unidades produzidas, no entanto o preço de compra para o consumidor ainda está elevado. (FRANCISCHETTI; SANTOS; SILVA, 2014). A Tabela 1, a seguir, apresenta um comparativo da taxa de crescimento anual na venda de veículos elétricos em comparação aos demais veículos que utilizam outras fontes de energia com base em motores de combustão interna no território brasileiro.

Tabela 1 – Taxa de crescimento anual de veículos

Ano	Total de veículos (un.)					Taxa de crescimento anual (%)				
	Gasolina	Etanol	Flex fuel	Elétrico Híbrido	Diesel	Gasolina	Etanol	Flex fuel	Elétrico Híbrido	Diesel
2005	697006	32357	812104	0	173177	-	-	-	-	-
2006	316559	1863	1430334	3	178979	-55%	-94%	76%	-	3%
2007	245653	107	2003090	3	213875	-22%	-94%	40%	0%	19%
2008	217016	84	2329247	9	273994	-12%	-21%	16%	200%	28%
2009	221688	70	2652298	22	167162	2%	-17%	14%	144%	-39%
2010	280677	50	2876173	29	358135	27%	-29%	8%	32%	114%
2011	376802	51	2848071	200	408124	34%	2%	-1%	590%	14%
2012	273915	52	3162822	117	365165	-27%	2%	11%	-42%	-11%
2013	189109	34	3169080	491	408656	-31%	-35%	0%	320%	12%
2014	184841	14	2940494	855	371808	-2%	-59%	-7%	74%	-9%
2015	34853	10	574273	189	39548	-81%	-14%	-80%	-78%	-89%

Fonte: ANFAVEA (2015).

De acordo com a ANFAVEA, apesar de uma queda no mercado interno de licenciamento de veículos de 3,76 milhões em 2013 para 3,49 milhões em 2014 e em 2015 para 648,8 mil veículos, que se pode atribuir à queda do mercado interno e à redução das exportações, estima-se, ao atribuir uma projeção de crescimento de 3% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, um licenciamento de 7,4 milhões de unidades por ano em 2034, podendo chegar a 95,2 milhões de veículos no território nacional.

Diante das pesquisas realizadas, muitas apresentam características de equipamentos que seriam indicados ou até mesmo valores de potência e torque ao subsistema de trem de força, o que poderia tornar o sistema complexo ou com custos elevados. No entanto, não foram encontradas pesquisas que pudessem explorar equipamentos já existentes de uso comum à indústria para serem utilizados em veículos elétricos. Sendo assim, neste trabalho, procura-se investigar equipamentos elétricos industriais produzidos em larga escala que possam ser inseridos no sistema de propulsão veicular. Este trabalho, portanto, mostra-se inovador na área de pesquisa para equipamentos elétricos e sistema de tração veicular.

Neste trabalho, busca-se investigar alternativas que possam apresentar uma melhor configuração para o sistema de propulsão, contribuindo para os parâmetros de necessidades técnicas de potência, torque e velocidade. Utilizando as técnicas de métodos axiomáticos, objetiva atribuir critérios funcionais para variáveis de equipamentos que possam auxiliar na escolha dos equipamentos elétricos para atender às necessidades técnicas do projeto.

O Quadro 6, a seguir, apresenta, resumidamente, os principais autores encontrados na revisão da literatura que proporcionam uma melhor fundamentação para este trabalho.

Quadro 6 – Obras de fundamentação para o trabalho

Título	Autor(es)	Ano	Objetivo	Metodologia
Modelagem de máquinas elétricas para aplicações automotivas utilizando mapas de eficiência	Lukic; Emado	2003	Determinar a melhor combinação de torque e velocidade específica através das características do mapa de eficiência de motores elétricos	Mapas de eficiência de motores elétricos
Seleção de unidades de motores elétricos para veículos elétricos	Xue; Cheng; Cheung	2008	Realizar uma investigação comparativa em motores elétricos a fim de encontrar um motor para transmissão mais adequado à aplicação de veículo elétrico	Investigação comparativa sobre eficiência, peso, custo, refrigeração, velocidade máxima, tolerância a falhas, segurança e confiabilidade em motores do tipo: relutância comutada (SEM), motor de indução, ímãs permanentes DC sem escovas e motores de corrente contínua com escovas
Desenvolvimento de novas configurações de sistemas híbridos de motorização e análise de desempenho longitudinal veicular	Tanikawa <i>et al.</i>	2010	Definir o melhor modelo de configuração do sistema de tração veicular para veículos elétricos e híbridos através de estudo isolado de cada equipamento do sistema de transmissão e potência	Estudo por quadro morfológico de forma isolada
Projeto de um veículo automotivo urbano de dois lugares com propulsão elétrica	Araujo	2011	Desenvolver um modelo de veículo elétrico a partir da seleção de suas configurações para atender requisitos de autonomia, aceleração, velocidade e carga máxima	Elaboração dos modelos para a propulsão com investigação de seus desempenhos e otimização de suas características, seguindo o conceito de espiral de projeto realizado por matriz de decisão
Tração de veículos elétricos urbanos: realizações e tendências	Ilie; Petru; Esanu	2012	Identificar tendências e realizações para projetos do sistema de tração em veículos elétricos urbanos	Pesquisa comparativa em motores e conversores do sistema de potência de tração de veículos elétricos, com objetivo de avaliar eficiência de controle, consumo de energia e confiabilidade
Inversores para tração em veículos elétricos híbridos	Ye; Yang; Emadi	2012	Explorar e comparar as diferentes topologias de inversores de tração para veículos elétricos híbridos	Análise comparativa de potência de inversores de tração para aplicação em veículos elétricos híbridos

Continua

Conclusão

Título	Autor(es)	Ano	Objetivo	Metodologia
Estudo de possibilidades para introdução de veículos elétricos no tráfego urbano da cidade de São Paulo: uma abordagem por meio de análise morfológica	Pupo	2012	Explorar possibilidades válidas de trem de força para a introdução de veículos elétricos no tráfego urbano	Análise morfológica
Sistema de <i>PowerTrain</i> elétrico para E-Scooter com dois motores conectados às rodas traseiras	Lee; Kim; Ahn	2013	Desenvolvimento de um processador de baixo custo para controle linear de dois motores de tração BLDC de 48V DC em E-Scooter utilizando sensores <i>Hall</i>	Aplicando o método senoidal trifásico em velocidade constante de cruzeiro e em baixas velocidades através da excitação de duas fases
Desenvolvimento de um veículo elétrico urbano como trabalho multidisciplinar em engenharia elétrica	Bonato <i>et al.</i>	2013	Proporcionar um sistema de propulsão simples e de baixo custo através de motores brushless conectado diretamente às rodas.	Análise morfológica
Estudo comparativo de diferentes potências de baterias para o sistema de propulsão de veículos elétricos	Silva <i>et al.</i>	2015	Explorar um modelo para melhor configuração do sistema de propulsão	Método de estratégia de gestão de energia baseado no estado de carga da bateria
Exploração para um sistema ótimo de mobilidade utilizando métodos de desenvolvimento axiomático e matriz de ponderação	Barbieri; Campatelli	2015	Avaliar diferentes soluções de mobilidade elétrica para sustentabilidade em centros urbanos	Avaliação multicritério baseada em matriz de ponderação e métodos axiomáticos

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

4 METODOLOGIA

A investigação para a viabilidade do sistema de tração com equipamentos industriais foram distribuídas em três fases, descritas a seguir.

Na Fase 1, análise de dinâmica veicular atribuída ao projeto, são definidos os parâmetros de potência, torque e a rotação no eixo do motor para o veículo proporcionar a velocidade máxima, nesta fase também busca identificar as forças resistivas que possam influenciar no desenvolvimento do veículo elétrico urbano.

Na Fase 2, examinar configuração do sistema de trem de força, o fluxo de atuação de força pode ser determinado através da interação morfológica de possíveis configurações. As soluções são investigadas através da exploração de equipamentos industriais de propósitos gerais à indústria, por meio da metodologia de métodos axiomáticos em que são explorados os requisitos funcionais e parâmetros do projeto na matriz axiomática do projeto. Em seguida, a árvore de requisitos das funções busca apresentar um conjunto de ações para encontrar a melhor solução para a configuração de propulsão do projeto, em que são definidas três configurações possíveis para a propulsão.

Na Fase 3, verificação dos equipamentos atribuídos ao subsistema de tração, de acordo com os critérios das fases anteriores, são avaliados os equipamentos comerciais que possam ser inseridos ao projeto. Quatro modelos de motores elétricos comerciais e seis modelos de inversores de frequência são explorados de acordo com as características técnicas de seus respectivos fabricantes, para que possam apresentar a melhor solução para o subsistema de propulsão, assim como duas tecnologias de fonte de energia para alimentação dos equipamentos. Em seguida a essa fase, após serem definidos os equipamentos, eles são ponderados quanto às características de viabilidade econômica e peso que possam atribuir à carroceria do veículo.

4.1 Fase 1: Dinâmica veicular atribuída ao projeto

O objetivo nessa fase é identificar os parâmetros referentes às características do veículo que possam fornecer recursos e elementos necessários mínimos para o sistema de propulsão. Com estes parâmetros, busca vencer forças resistivas que se opõem ao seu movimento e que possam influenciar no desempenho longitudinal do veículo.

Os parâmetros para a avaliação da propulsão, são: capacidade de transporte, neste caso para dois ocupantes, condição mínima de transporte de carga em centros urbanos, condições

de velocidade e torque de tração necessários para trafegar em vias públicas urbanas. Através das características dinâmicas são definidos os parâmetros mínimos de potência, torque e velocidade necessários para ser desenvolvidos pelo propulsor elétrico. Os parâmetros de especificação de projeto para o veículo são identificados no Quadro 7, a seguir.

Quadro 7 – Parâmetros para o veículo

Parâmetro	Símbolo	Valor
Coefficiente de atrito ao rolamento	f_r	0,015
Massa do veículo	m	800 Kg
Capacidade de carga útil	m	280 Kg
Aceleração gravitacional	g	9,81m/s ²
Inclinação de pista	α	0% (0°) ...18% (10°)
Massa específica do ar	ρ_a	1,25 Kg/m ³
Arraste aerodinâmico	C_d	0,35 (adimensional)
Área frontal do veículo	A_f	2,26 m ²
Velocidade máxima do veículo	V	80 Km/h
Velocidade do vento	V_v	0 Km/h
Massa equivalente dos componentes girantes	m'_v	3% · m kg
Rendimento da transmissão	η_t	1
Relação de transmissão	i_g	1
Raio dinâmico roda/pneu	rd	0,2 m
Ocupantes	—	2

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Através da carga útil, juntamente com a massa do veículo e a velocidade máxima desejada, definidas no Quadro 7, torna-se possível determinar a potência necessária para o motor propulsor movimentar o veículo na equação 2.1. Dessa forma, as forças que se opõem ao deslocamento do veículo, conforme as definições impostas ao projeto no Quadro 7, são mencionadas no quadro 8. Os resultados apresentados se referem as características de desempenho máximo, e o tempo de aceleração para o veículo atingir sua velocidade máxima proporcionando torque máximo é dependente do momento de inércia do peso do veículo imposto ao eixo do motor.

Quadro 8 – Dimensionamento das forças resistivas

Descrição	Símbolo	Característica ambiente/veículo	Equação de referência	Valor	Unidade
Força de resistência ao rolamento	FR_r	Plano horizontal com inclinação nula, os valores de coeficiente de atrito ao rolamento (f_r) para o equacionamento foram tomados com base na pavimentação de asfalto, conforme Quadro 7.	2.2	158,92	[N]
Força de resistência à inclinação de pista	Fg	As características de topografia são definidas para vencer forças de resistências de inclinação de pista com ângulos inferiores a 18%. No equacionamento, utilizou-se um plano horizontal com inclinação nula. ²	2.3	0	[N]
Força de resistência aerodinâmica	Fw	Definida através da velocidade máxima desejada e das características aerodinâmicas do veículo.	2.5	244,14	[N]
Força de inércia componentes girantes	Fwa	Inércia dos componentes girantes.	2.8	32,40	[N]
Força de resistência à aceleração	Fa	Veículo com lotação máxima, em momento inércia	2.22 ³	21,78	[kgm ²]
Potência de tração	$P_{tração}$	Potência necessária ao motor propulsor para desenvolver a velocidade máxima necessária como parte aos requisitos do projeto ao plano horizontal com inclinação nula.	2.1	33,67	[kW]
Torque de tração	Tm	Torque máximo deferido para topografias com inclinação inferiores a 18%.	2.11	305,00	[N.m]
Rotação	n_N	A rotação necessária para o motor fornecer a velocidade máxima do veículo.	2.13	1056	[rpm]

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

² A força de resistência na inclinação de pista apresenta características distintas conforme a variação de inclinação que a topografia apresentar.

³ Para a força de resistência a aceleração se considerou o momento de inércia imposto sobre o eixo do motor ao qual apresentar influencia no tempo de aceleração na equação 2.23

Em inclinações elevadas não se torna necessário utilizar toda a potência do motor, e sim o torque disponibilizado por ele. Estando o motor de propulsão conectado diretamente na roda, o rendimento e a relação de transmissão apresentam valores unitários. O torque a ser disponibilizado pelo motor elétrico considera vencer as condições de topografia com inclinação máxima (18%). Com o motor conectado diretamente na roda, o torque é disponibilizado na relação do raio dinâmico da roda, como definido no Quadro 7.

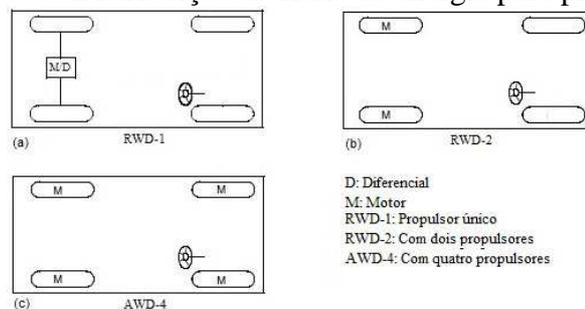
Em resumo, destacam-se os requisitos necessários para o desempenho do propulsor no projeto:

- A potência necessária que poderá ser distribuída entre os propulsores tem como requisitos mínimos $33,70kW$.
- O torque a ser disponibilizado pelo propulsor de $305N.m$ busca vencer as resistências de rolamento para velocidade máxima com ângulo de inclinação das vias nulo.
- A rotação do eixo do motor para que possa fornecer a velocidade máxima como parte dos requisitos do projeto deverá ser de $1056 rpm$.

4.2 Fase 2: Configuração do sistema de trem de força

Nessa fase, o objetivo é identificar o fluxo de atuação de força e potência conforme a configuração do sistema do trem de força desejado. Através de uma análise morfológica, objetiva-se apresentar alternativas para a configuração do sistema de propulsão. Para que estas alternativas sejam melhores exploradas, são definidas três configurações para propulsão, conforme a Figura 30, a seguir.

Figura 30 – Distribuição do fluxo de energia para propulsão



Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

No item **a** da Figura 30, é avaliado o comportamento dos equipamentos de propósito geral à indústria adaptados ao subsistema de propulsão com propulsor único conectado de

forma RWD. De forma semelhante ocorre no item **b**, com os propulsores conectados diretamente nas rodas. No item **c**, avalia-se o comportamento dos equipamentos quando os propulsores estão distribuídos no veículo na configuração AWD.

Com base nos objetivos de critérios apresentados no Quadro 5, podem ser aplicadas a cada variável do sistema possibilidades combinatórias não quantitativas que possam atender às necessidades do projeto. O Quadro 9, a seguir, apresenta a interação morfológica para possíveis soluções.

Quadro 9 – Quadro morfológico para possíveis soluções

Veículo elétrico urbano					
Descrição	Função	Soluções			
Fonte	Armazenar energia	Chumbo-ácido			Lítio-íon
		Automotiva	Estacionária	Tracionária	
Configurações	Distribuir forças de movimento	RWD-1	RWD-2	AWD-4	
		1 motor	2 motores	4 motores	
Acoplamento	Transferir força de movimento	Direto		Caixa de redução	
Propulsor	Proporcionar torque/velocidade	Indução			
		Gaiola de esquilo			
Controle	Acionar do sistema de propulsão	Inversor de frequência controle vetorial			
		Encoder			

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Diante das variáveis para a distribuição do sistema de tração do veículo, como; fonte de energia, modelo de configuração de tração, tipo de acoplamento para distribuição de fluxo de energia, propulsor e controle, as possíveis configurações podem ser determinadas realizando a multiplicação de todas as variáveis das soluções possíveis, que expressa o número de possibilidades de modelos para o sistema de tração no veículo com base no Quadro 9.

Novas interações a fim de melhor definir soluções para o projeto e investigar equipamentos industriais podem ser dadas através da equação 2.29 para cada necessidade do projeto. Conforme o Quadro 5, o Anexo A apresenta a matriz axiomática para os requisitos funcionais e parâmetros de projeto, na matriz, através da equação 2.30, as interações visam atender a cada necessidade do projeto através de parâmetros funcionais por premissas consideradas evidentes e verdadeiras ao projeto, como exemplo na matriz do quadro 10, a seguir, que através da equação 2.30 aplicada a cada requisito funcional define parâmetros para atender cada necessidade do projeto.

Quadro 10 Matriz de interações

Necessidades Usuário	Níveis	FR - Requisitos Funcionais				DP - Parâmetros do projeto										
		FR1	FR11	FR111	FR1111	DP1	DP11	DP111	DP1111	DP1112	DP112	DP1121	DP1122	DP113	DP1131	...
Ambiental	1	FR1: Propor sistema de tração elétrica														
	2	FR11: Reduzir poluição														
	3	FR111: Atender normas ambientais														
	4	FR1111: Definir normas														
	4	FR1112: Permitir novas especificações														
	3	FR112: Apresentar alternativa														
	4	FR1121: Proporcionar baixo custo														
	4	FR1122: Proporcionar popularidade														
	3	FR113: Melhorar qualidade do ar														
	4	FR1131: Reduzir doenças respiratórias														

FR/DP	DP1	DP11	DP111	DP1111	DP1112	DP112	DP1121	DP1122	DP113	DP1131	...
FR1	X										
FR11	x	X									
FR111	x	x	X								
FR1111				X							
FR1112					X						
FR112		x	x		x	X					
FR1121	x	x				x	X				
FR1122								X			
FR113		x							X		
FR1131	x	x	x							X	
...											...

Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

A figura 31, a seguir, apresenta o exemplo da interação entre os domínios dos requisitos funcionais e os parâmetros do projeto para atender as necessidades do projeto.

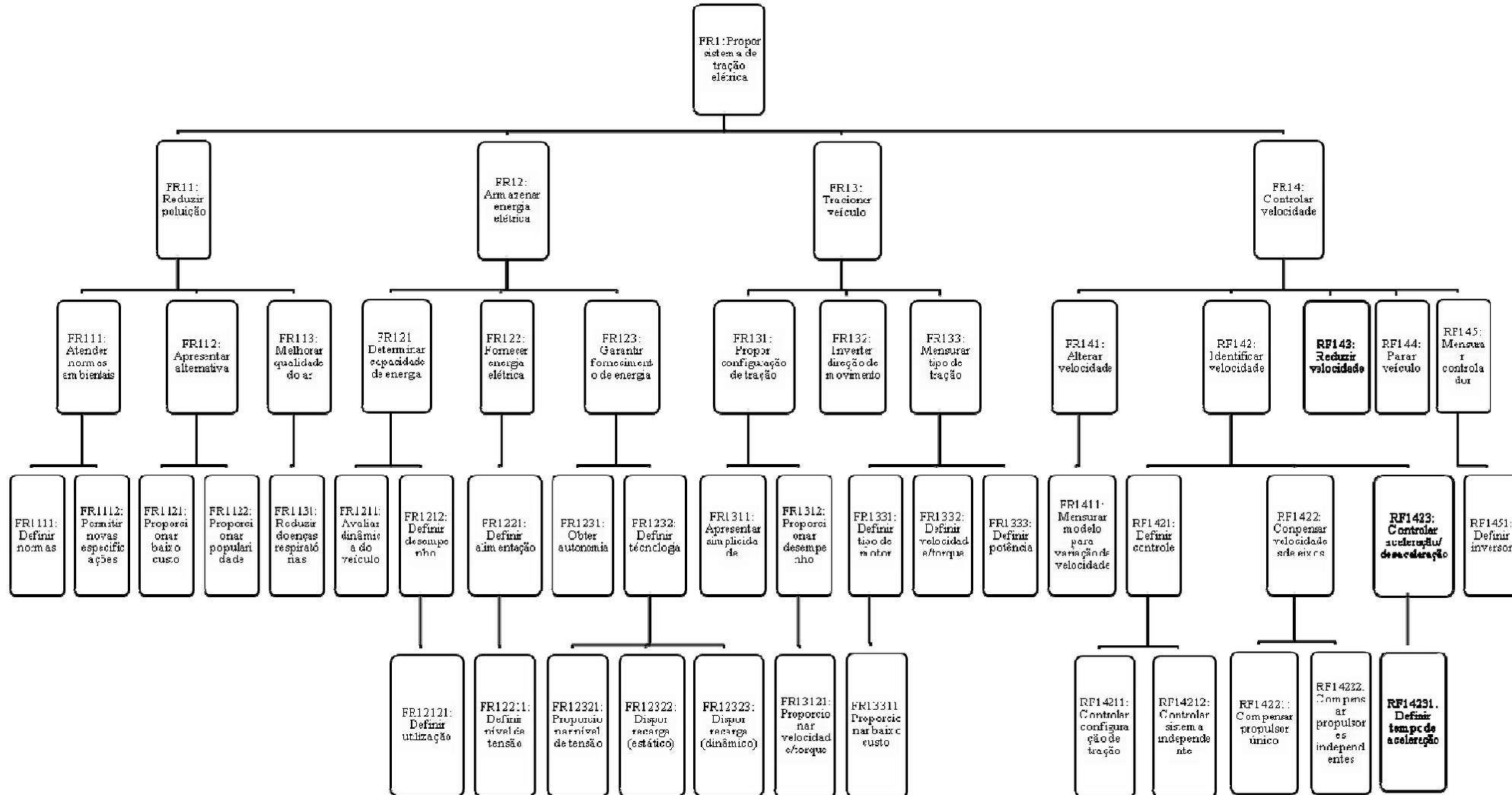
Figura 31. Modelo de interação entre os domínios



Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

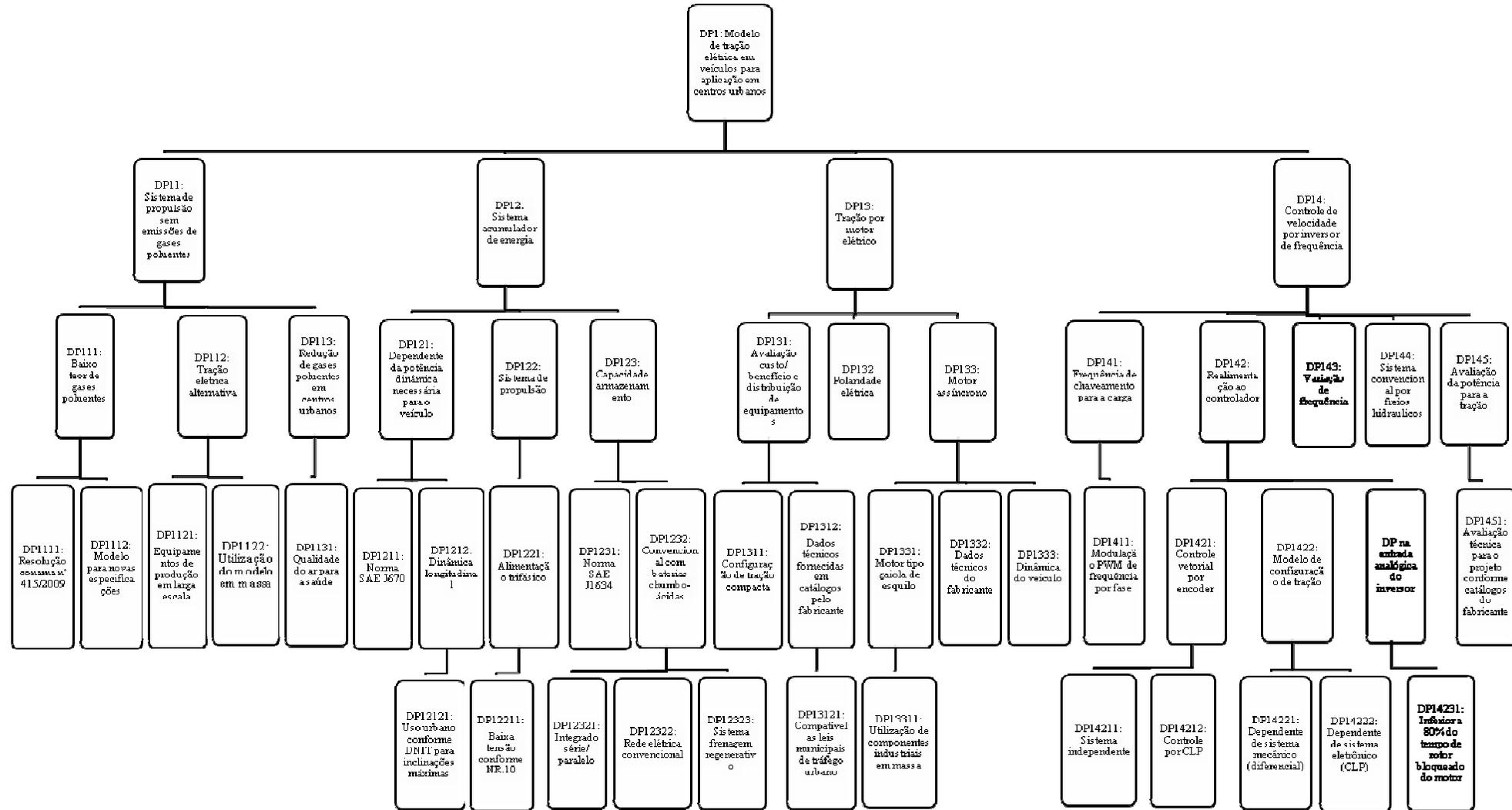
Os Fluxogramas 1 e 2, a seguir, referem-se à árvore de requisitos das funções entre as interações dos domínios. No Fluxograma 1, apresenta-se a árvore de requisitos para o projeto; no Fluxograma 2, apresentam-se os parâmetros do projeto que definem um conjunto de ações propostas para encontrar a melhor solução para o sistema de propulsão, tendo como base os procedimentos racionais e sistemáticos extraídos da matriz axiomática do Anexo A, em que cada componente na matriz apresenta suas próprias funções, buscando atender os requisitos do axioma de independência para uma melhor solução de projeto na equação 2.31.

Fluxograma 1 – Árvore de requisitos para o projeto



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Fluxograma 2 – Árvore de parâmetros para o projeto



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

4.3 Fase 3: Equipamentos atribuídos ao subsistema de tração

O objetivo nessa fase é verificar as características dos equipamentos industriais de propósitos gerais que possam ser utilizados no veículo conforme os critérios de projeto definidos nas fases 1 e 2.

Os motores elétricos são definidos de acordo com as características de potência máxima, torque de tração, rotação para velocidade máxima e configuração do sistema de tração do veículo conforme características apresentadas no Quadro 8 e configuração de tração da Figura 30.

Os critérios de potência e torque para propulsão podem estar distribuídos conforme a configuração do sistema de tração. Dessa forma, os critérios de potência, torque e rotação dos propulsores podem estar distribuídos conforme Quadro 11, a seguir.

Quadro 11 – Requisitos de projeto/comercial dos motores de propulsão

Configuração do sistema de tração	Requisitos de projeto			Requisito comercial		
	Potência	Torque	Velocidade	Potência	Torque	Velocidade
RWD-1	33,67 kW	304,30 N.m	1056 rpm	37,00 kW	Dependente do número de polos	Dependente do número de polos
RWD-2	16,84 kW	152,18 N.m	1056 rpm	18,50 kW		
AWD-4	8,42 kW	76,10 N.m	1056 rpm	9,20 kW		

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

O Quadro 12, a seguir, apresenta o equacionamento para definir o propulsor a ser utilizado, que é determinado através das características dos Quadros 7 e 8, da Figura 30 e dos requisitos do Fluxograma 1 e parâmetros do Fluxograma 2.

Quadro 12 – Equacionamento para o dimensionamento do motor elétrico

Descrição	Símbolo	Característica	Equação de referência	Versão de Configuração de tração	Valor requisito para o projeto	Valor referência comercial	Unidade
Potência de tração	$P_{tração}$	Potência necessária ao motor propulsor para desenvolver a velocidade máxima	2.1	RWD-1	33,67	37,00	[kW]
				RWD-2	16,84	18,50	
				AWD-4	8,42	9,20	
Torque de tração	T_m	Torque máximo deferido para topografias com inclinação inferior a 18%	2.11	RWD-1	304,30	305,00	[N.m]
				RWD-2	152,18	153,00	
				AWD-4	76,10	76,70	
Rotação	n_N	A rotação necessária para o motor fornecer a velocidade máxima do veículo	2.13	RWD-1	1056	1175	[rpm]
				RWD-2	1056	1175	
				AWD-4	1056	1175	
Conjugado médio do motor	$C_{mméd}$	Torque mecânico característico médio no eixo do motor	2.20	RWD-1	615,29	-	[N.m]
				RWD-2	324,20	-	
				AWD-4	174,46	-	
Conjugado resistente	C_{rmed}	Torque médio requerido pela carga	2.21	RWD-1	304,30	-	[N.m]
				RWD-2	152,18	-	
				AWD-4	76,10	-	
Momento de inércia total	J_t	Momento de inércia total aplicada no motor, o que atribui para a resistência de aceleração até o motor atingir a rotação de torque máximo	2.22	RWD-1	21,78	-	[kg.m ²]
				RWD-2	10,89	-	
				AWD-4	5,45	-	
Tempo de aceleração	t_a	Tempo de aceleração que o motor elétrico possa levar para sair de sua condição de repouso até atingir a velocidade de conjugado máximo	2.23	RWD-1	8,02	$t_a \leq 0,8 \cdot trb$	[s]
				RWD-2	7,18		
				AWD-4	6,23		

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Através do equacionamento apresentado no Quadro 12, são apresentados no Quadro 13, a seguir, os parâmetros dos motores a serem verificados para que possam ser inseridos no sistema de propulsão. Verificam-se motores com características construtivas de 2, 4 e 6 polos para as versões de configuração de tração RWD-1, RWD-2 e AWD-4.

Quadro 13 – Parâmetros dos motores para propulsão

Versão	Parâmetros para o motor (projeto)												Parâmetros fabricantes (catálogo)					Condições de especificação	
	Potência motor comercial (W)	Polos motor	rpm máx. eixo motor (rpm)	rpm máx. eixo carga (rpm)	Torque nominal da carga (N.m)	Potência requerida na carga (W)	Potência requerida no motor (W)	Conj. Méd. Motor (N.m)	Conj. Méd. Carga (N.m)	Conj. Resistente. Méd. da Carga (N.m)	Mom. Iner. Req. Eixo Mot. (kg.m ²)	Tempo Aceleração (s)	Se ta <= 0,8*trb (s)	Conjugado com rotor bloqueado Cp/Cn (%)	Conjugado Máximo Cmax/Cn (%)	Conjugado nominal Cn (kgf.m)	Momento de inercia Jm (kg.m ²)		Tempo máx. com rotor bloqueado Trb (s)
RWD-1	37000,00	6	1056,58	1056,58	304,37	33676,84	33676,84	615,29	304,37	304,37	21,78	8,02	8,80	2,10	2,50	30,30	0,754	11,0	Ok. Motor atente as condições de projeto
RWD-2	18500,00	6	1056,58	1056,58	152,18	16838,42	16838,42	324,20	152,18	152,18	10,89	7,18	7,20	2,20	2,60	15,30	0,272	9,0	
AWD-4	9200,00	6	1056,58	1056,58	76,09	8419,21	8419,21	174,46	76,09	76,09	5,45	6,23	6,40	2,10	3,10	7,60	0,097	8,0	
RWD-1	37000,00	4	1056,58	1056,58	304,37	33676,84	33676,84	459,28	304,37	304,37	21,78	15,78	8,00	2,50	2,60	20,40	0,307	10,0	Não ok, tempo de aceleração > que Trb
RWD-2	18500,00	4	1056,58	1056,58	152,18	16838,42	16838,42	270,17	152,18	152,18	10,89	10,67	5,60	2,80	3,20	10,20	0,487	7,0	
AWD-4	9200,00	4	1056,58	1056,58	76,09	8419,21	8419,21	123,83	76,09	76,09	5,45	12,75	6,40	2,40	3,10	5,10	0,056	8,0	
RWD-1	37000,00	2	1056,58	1056,58	304,37	33676,84	33676,84	229,64	304,37	304,37	21,78	-32,47	9,60	2,40	2,70	10,20	0,147	12,0	Não ok, tempo de aceleração > que Trb
RWD-2	18500,00	2	1056,58	1056,58	152,18	16838,42	16838,42	112,35	152,18	152,18	10,89	-30,52	5,60	2,10	2,90	5,09	0,098	7,0	
AWD-4	9200,00	2	1056,58	1056,58	76,09	8419,21	8419,21	56,95	76,09	76,09	5,45	-31,63	5,60	2,20	2,80	2,58	0,028	7,0	

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

No Quadro 13 pode ser identificado que os propulsores nas características construtivas de 2 e 4 polos, independentemente do tipo de configuração para propulsão, não atendem requisitos para o projeto, pois apresentam o conjugado nominal inferior às necessidades para o veículo. Além disso, o tempo de aceleração é superior ao tempo de rotor bloqueado especificado pelo fabricante, podendo provocar superaquecimento nos condutores do motor elétrico e danificar o material isolante, assim como baixo desempenho para o veículo.

Portanto, os propulsores com características construtivas de 6 polos apresentam melhores resultados para que possam ser inseridos ao sistema de propulsão elétrica para um veículo, apresentam tempo de aceleração inferior ao tempo de rotor bloqueado e conjugado nominal elevado. Diante dos resultados apresentados para os motores de 6 polos no Quadro 13, no Quadro 14, a seguir, são avaliados os resultados para motores de 6 polos de quatro fabricantes distintos com referência no mercado nacional. Sendo a fabricante “A” *Siemens*, “B” *Weg*, “C” *Voges* e “D” *Nova*, explorando os modelos de motores 225-M para 37 kW na configuração RWD-1, 180-L para 18,5 kW na configuração RWD-2 e 160-M para 9,2 kW na configuração AWD-4. Os resultados têm como base o modelo da versão de configuração de tração, potência, torque, tempo de aceleração e especificações de dados técnicos do fabricante.

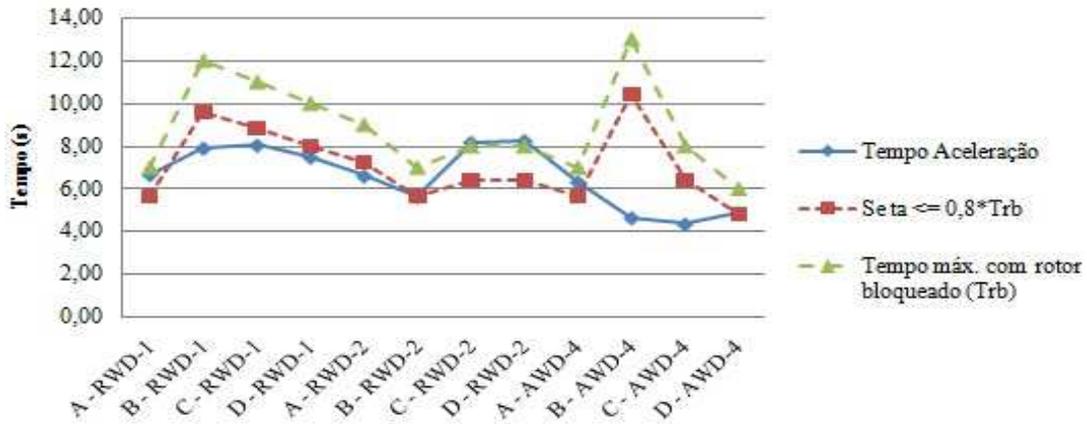
Quadro 14 – Parâmetros por fabricantes de motores de 6 polos

Modelo	Parâmetros para o motor (Projeto)													Parâmetros fabricantes (catálogo)					
	Fabricante/versão	Potência motor comercial (W)	Polos motor	rpm máx. eixo motor (rpm)	rpm máx. eixo carga (rpm)	Torque nominal da carga (N.m)	Potência requerida na carga (W)	Potência requerida no motor (W)	Conj. Méd. Motor (N.m)	Conj. Méd. Carga (N.m)	Conj. Resistente. Méd. da Carga (N.m)	Mom. Iner. Req. Eixo Mot. (kg.m²)	Tempo Aceleração (s)	Se ta <= 0,8*Trb (s)	Conjugado com rotor bloqueado Cp/Cn (%)	Conjugado Máximo Cmax/Cn (%)	Conjugado nominal Cn (kgf.m)	Momento de inercia Jm (kg.m²)	Tempo máx. com rotor bloqueado
A - RWD-1	37000,00	6	1056,58	1056,58	304,37	33676,84	33676,84	675,42	304,37	304,37	21,78	6,68	5,60	2,50	2,60	30,00	0,6240	7,0	N.ok
B - RWD-1	37000,00	6	1056,58	1056,58	304,37	33676,84	33676,84	619,35	304,37	304,37	21,78	7,92	9,60	2,10	2,50	30,50	0,7511	12,0	ok
C - RWD-1	37000,00	6	1056,58	1056,58	304,37	33676,84	33676,84	642,04	304,37	304,37	21,78	8,05	8,80	2,10	2,70	30,30	2,7999	11,0	ok
D - RWD-1	37000,00	6	1056,58	1056,58	304,37	33676,84	33676,84	640,14	304,37	304,37	21,78	7,49	8,00	2,40	2,40	30,21	0,9526	10,0	ok
A - RWD-2	18500,00	6	1056,58	1056,58	152,18	16838,42	16838,42	337,71	152,18	152,18	10,89	6,62	7,20	2,50	2,60	15,00	0,2030	9,0	ok
B - RWD-2	18500,00	6	1056,58	1056,58	152,18	16838,42	16838,42	371,48	152,18	152,18	10,89	5,63	5,60	2,50	3,00	15,30	0,2700	7,0	ok
C - RWD-2	18500,00	6	1056,58	1056,58	152,18	16838,42	16838,42	314,07	152,18	152,18	10,89	8,18	6,40	2,20	2,45	15,30	1,0800	8,0	N.ok
D - RWD-2	18500,00	6	1056,58	1056,58	152,18	16838,42	16838,42	302,55	152,18	152,18	10,89	8,26	6,40	2,20	2,30	15,23	0,3360	8,0	N.ok
A - AWD-4	9200,00	6	1056,58	1056,58	76,09	8419,21	8419,21	173,07	76,09	76,09	5,45	6,32	5,60	1,70	2,70	8,91	0,0975	7,0	N.ok
B - AWD-4	9200,00	6	1056,58	1056,58	76,09	8419,21	8419,21	209,35	76,09	76,09	5,45	4,65	10,40	2,40	2,80	9,12	0,1492	13,0	ok
C - AWD-4	9200,00	6	1056,58	1056,58	76,09	8419,21	8419,21	227,44	76,09	76,09	5,45	4,35	6,40	2,20	3,40	9,20	0,5099	8,0	ok
D - AWD-4	9200,00	6	1056,58	1056,58	76,09	8419,21	8419,21	202,63	76,09	76,09	5,45	4,89	4,80	2,10	2,90	9,18	0,1490	6,0	ok

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Nos modelos apresentados no Quadro 14, apesar de todos atenderem às condições de potência, torque e rotação necessários para serem aplicados ao sistema de tração, alguns não atendem ao critério de tempo máximo de rotor bloqueado, de acordo com a configuração de tração, como mostra o Gráfico 1, a seguir, em decorrência do momento de inércia da massa do veículo dispor sobre o eixo de rotação do motor. O tempo máximo com rotor bloqueado é fornecido de acordo com as especificações técnicas de cada fabricante ao modelo do motor elétrico, o tempo de aceleração inferior a 80% se refere a recomendação de alguns fabricantes para prolongar a vida útil do motor e a curva do tempo de aceleração se refere ao tempo máximo para o motor atingir a rotação máxima no eixo fornecendo torque máximo.

Gráfico 1 – Tempo de aceleração
Aceleração



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Os motores elétricos da marca **A** para a configuração RWD-1, os motores das marcas **C** e **D** na configuração RWD-2 e o motor da marca **A** na configuração AWD-4 apresentam o tempo de aceleração superior ao tempo máximo de rotor bloqueado, podendo haver algum modo de problema ocasionado por superaquecimento quando empregado com os modelos citados.

Dessa forma, os motores **B**, **C** e **D** na configuração RWD-1, **A** e **B** na configuração RWD-2 e **B**, **C** e **D** na configuração AWD-4 apresentam as melhores características técnicas para a propulsão do veículo.

O consumo da fonte de energia pode ser determinado através de um ciclo de condução específico urbano em softwares dedicados. No entanto, o consumo de energia pode ser estimado através das características dinâmicas do veículo e pode ser aproximado considerando um ciclo urbano com velocidade fixa. Dessa forma, torna-se necessário definir a potência necessária para manter o veículo nesta velocidade.

A potência necessária para a fonte de energia pode ser aproximada através de uma velocidade média fixa de 53 km/h, esta velocidade pode ser considerada através das médias de velocidades máximas para o código brasileiro de trânsito em vias urbanas. Em vias urbanas o código brasileiro de trânsito indica a velocidade máxima de 80 km/h para as vias de trânsito rápido, 60 km/h em vias arteriais, 40km/h em vias coletoras e 30 km/h para vias locais.

Considera-se que a tensão nominal eficaz de alimentação para o propulsor elétrico, conforme dados técnicos do fabricante, seja de 380 volts, podendo obter uma variação máxima de tensão entre a mínima permitida para a alimentação de -15% e a máxima de 10% da tensão nominal. O equacionamento que define a fonte de alimentação é apresentado no Quadro 15, a seguir.

Quadro 15 – Equacionamento para o dimensionamento da fonte

Descrição	Símbolo	Característica	Equação de referência	Valor	Unidade
Tensão de pico	V_{pico}	Tensão de pico alimentação da fonte	2.19	537,40	[V]
Tensão mínima	-	Tensão de pico mínima de alimentação da fonte	$-0,15 \cdot V_{pico}$	456,80	[V]
Tensão máxima	-	Tensão de pico máxima de alimentação da fonte	$+0,10 \cdot V_{pico}$	591,14	[V]
Número de células	$N_{(células)}$	Elementos necessários para a fonte de tensão, assumindo uma variação de -15% a +10% da tensão nominal	2.24 ⁴	254,00	Unidades
Corrente de consumo	I_N	Corrente de consumo	2.18 ⁵	36,00	[A]
Capacidade nominal	C	É dada pela taxa de descarga do consumo de corrente elétrica no decorrer o tempo em horas	2.25 ⁶	176,20	[Ah]
Volume de strings	N_{string}	Volume necessário de células conectadas em paralelo para atender às especificações de capacidade nominal	2.26	23	Unidades
Corrente de string	$string$	Corrente média de consumo	2.27	36,00	[A]
Energia	E_F	Capacidade nominal de energia	2.28	19,10	[kWh]

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Baterias chumbo-ácido com tensão superior a 12 V não são fáceis de serem encontradas, dessa forma, torna-se necessário agrupar células em série para obter a tensão da fonte para o projeto.

O Quadro 16, a seguir, apresenta possíveis configurações de fontes que podem fornecer energia ao sistema de propulsão conforme especificação do Quadro 15. As comparações são realizadas entre duas tecnologias de acumuladores de energia, sendo por acumulador chumbo-ácido pelas fabricantes *Moura* e *Johnson Controls* e acumulador de tecnologia de íon-lítio pela americana *Smart Battery*. Entre as tecnologias, são considerados

⁴ A tensão mínima em descarga de cada célula para a bateria chumbo-ácido apresenta-se em (456,79/254) 1,80 V, em carga (591,14/254) 2,32 V e tensão nominal (537/254) 2,10 V.

⁵ Considerando FP médio de motores elétricos trifásicos superiores a 0,80 e η superior a 90%.

⁶ Em baterias de chumbo-ácido, as especificações de regime de descarga são dadas em 5, 10 e 20 horas, o que equivale a taxas de descargas de 0,2, 0,1 e 0,05 da capacidade declarada. Em veículos elétricos de forma geral é utilizada uma taxa de descarga de 0,2.

para comparação; capacidade nominal da célula, peso e viabilidade econômica com base em dados técnicos de seus respectivos fabricantes.

Quadro 16 – Configurações de tecnologias para fonte de energia

Tensão nominal célula (V)	Tensão mínima por célula (V)	Capacidade fornecida pelo fabricante (Ah)	Capacidade nominal célula (W.h)	Tecnologia	Modelo	Configuração n. string (Un.)	Peso unitário (N)
12,0	1,8	40	480	Chumbo-ácido	Automotiva	23	90,80
12,0	1,8	40	480	Chumbo-ácido	Estacionária	23	120,50
12,0	1,8	40	480	Chumbo-ácido	Tracionária	23	100,20
12,0	3,2	40	480	Íon-lítio	Íon-lítio	21	50,90

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

O dimensionamento para o controlador/inversor de frequência é baseado de forma que possa atender às características dinâmicas impostas ao veículo e de acordo com os critérios da equação 2.29 e referente aos Fluxogramas 1 e 2 de parâmetros para o projeto.

O Quadro 17, a seguir, apresenta o equacionamento e as características para o dimensionamento do inversor de frequência que possa realizar o controle de velocidade para o sistema de tração.

Quadro 17 – Critérios para dimensionamento do controlador/inversor

Descrição	Símbolo	Característica	Equação de referência	Versão de configuração de tração	Valor requisito para o projeto	Valor referência comercial	Unidade
Potência	$P_{tração}$	Dependente da potência do propulsor	2.1	RWD-1	33,67	37,00	[kW]
				RWD-2	16,84	18,50	
				AWD-4	8,42	11,00	
Corrente	I_N	Corrente de consumo nominal	2.18	RWD-1	61,10	72,00	[A]
				RWD-2	32,87	38,00	
				AWD-4	16,34	25,00	
Tensão entrada/saída	V	Tensão de alimentação	-	Sistema	380	380	[V]
Fator de potência	FP	Fator médio considerado para dimensionamento	-	Inversores	0,90	0,90	-
Rendimento	η	Rendimento médio considerado para dimensionamento	-	Inversores	0,95	0,95	[%]
Controle	-	Vetorial	-	Com encoder	Método PWM senoidal		
Rotação de saída	n_s	Frequência para controle de rotação do motor	2.14	Sistema	0-60	Catálogo de fabricante	[rpm]

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

No Quadro 18, a seguir, são apresentados seis modelos de inversores de frequência com referência na utilização do mercado nacional, foram acurados os fabricantes; “A” Weg no modelo CFW-09, a fabricante “B” Altus no modelo NXP, a fabricante “C” Allen Bradley no modelo Power flex, a fabricante “D” Siemens no modelo Micromaster, a fabricante “E” ABB no modelo ACS-580 e a fabricante “F” Delta no modelo VFD-C para que possam realizar o controle no sistema de propulsão. Os resultados para definir a melhor alternativa do inversor para ser utilizado têm como base o modelo da configuração de tração, potência, corrente nominal de saída, tensão de alimentação, peso atribuído ao projeto, a viabilidade econômica, modo de controle, variação de frequência de saída e tipo do regulador.

Quadro 18 – Dimensionamento para o inversor de frequência

Versão	Fabricante	Modelo	Potência (kW)	Corrente nominal de saída (A)	η_i (%)	Controle	Frequência saída (Hz)	Regulador	Aceleração/desaceleração	Tensão entrada/saída (V)
RWD-1	A	AA	37,00	74	97	Vetorial/encoder	0-204	PWM senoidal	Programável de 0.0 a 999.0 segundos	380
RWD-2			18,50	39						
AWD-4			11,00	25						
RWD-1	B	BB	37,00	92	94	Vetorial/encoder	0-320	PWM senoidal	Programável de 0.1 a 3000 segundos	380
RWD-2			18,50	47						
AWD-4			11,00	24						
RWD-1	C	CC	37,00	65	97,5	Vetorial/encoder	0-325	PWM senoidal	Programável de 0 a 3600 segundos com incremento de 0.1 segundo	380
RWD-2			18,50	35						
AWD-4			11,00	22						
RWD-1	D	DD	37,00	75	96	Vetorial/encoder	0-650	PWM senoidal	10 segundos	380
RWD-2			18,50	38						
AWD-4			11,00	26						
RWD-1	E	EE	37,00	72	97,5	Vetorial/encoder	0-500	PWM senoidal	0.1 a 1800 segundos	380
RWD-2			18,50	38						
AWD-4			11,00	25						
RWD-1	F	FF	37,00	73	96	Vetorial/encoder	0-300	PWM senoidal	10 segundos	380
RWD-2			18,50	38						
AWD-4			11,00	24						

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

5 RESULTADOS

Com base nas especificações dos equipamentos e análise da dinâmica longitudinal veicular, foram determinados parâmetros necessários, como potência, torque de tração e velocidade, para o desempenho do veículo.

Assim foram procurados equipamentos comerciais de uso geral à indústria, que sejam produzidos em larga escala, como: motores elétricos, controladores/inversores de frequência, fonte de alimentação e um modelo de configuração de tração que pudessem atender às necessidades do projeto.

Os resultados obtidos tiveram como base os dados técnicos dos equipamentos fornecidos pelos fabricantes. Foram analisados quatro modelos de motores elétricos em três possíveis configurações para o sistema de tração.

Para o controle de velocidade e tração, foram avaliados seis modelos de inversores de frequência conforme respectiva configuração. Foram avaliadas duas tecnologias para comparação de armazenamento de energia, sendo por tecnologia chumbo-ácido nas características como fonte de alimentação automotiva, estacionária e tracionária e tecnologia de íon-lítio.

Após a verificação dos resultados de potência, torque, tempo de aceleração, configuração para o modelo de tração, características atribuídas ao inversor de frequência e fonte de alimentação mencionadas nos Quadros 9, 14, 16, 18 e na Figura 30, foi avaliado a viabilidade econômica e peso dos equipamentos selecionados para o sistema de propulsão.

A avaliação para o peso do sistema de propulsão pode ser observada de maneira distinta, ou seja, verificou-se o peso que o conjunto de equipamentos motor/inversor de forma padrão pudesse atribuir ao veículo, em seguida verificou-se o peso que cada modelo de tecnologia de fonte de energia pudesse impor no veículo. Posteriormente pode observar o peso que o conjunto do sistema de tração de acordo com cada fonte de energia poderia somar sobre o veículo.

De maneira semelhante ao peso, pode observar o custo dos equipamentos, sendo o motor/inversor observado de forma concomitante, ainda de forma distinta cada modelo de fonte de energia e o custo do sistema de tração. No entanto, o custo está condicionado a variação de impostos entre estados. Dessa forma o custo do sistema de tração atribuído ao projeto esta condicionado ao estado do Rio Grande do Sul – Brasil.

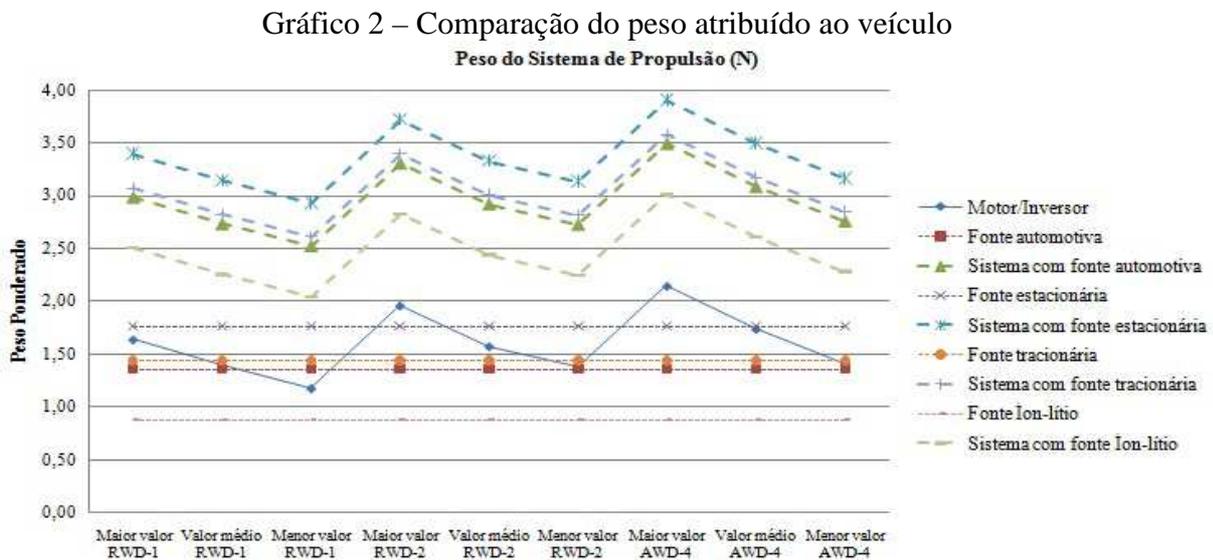
Para efeitos de comparação, foram utilizados dados técnicos do modelo de propulsão do veículo Smart Fortwo. Os dados de peso e a viabilidade econômica do veículo Smart

Fortwo foram comparados a cada alternativa gerada de acordo com o modelo da fonte de energia. Assim, compararam-se os resultados obtidos de peso e a viabilidade econômica dos equipamentos elétricos definidos, conforme Anexo B, para o projeto.

O Gráfico 2, a seguir, apresenta o peso máximo, médio e mínimo que cada configuração de tração pode atribuir na carroceria do veículo. Também ao gráfico 2, mencionado de forma distinta, pode se verificar o peso que cada modelo de fonte de energia e o motor elétrico juntamente com o inversor poderá adicionar na carroceria.

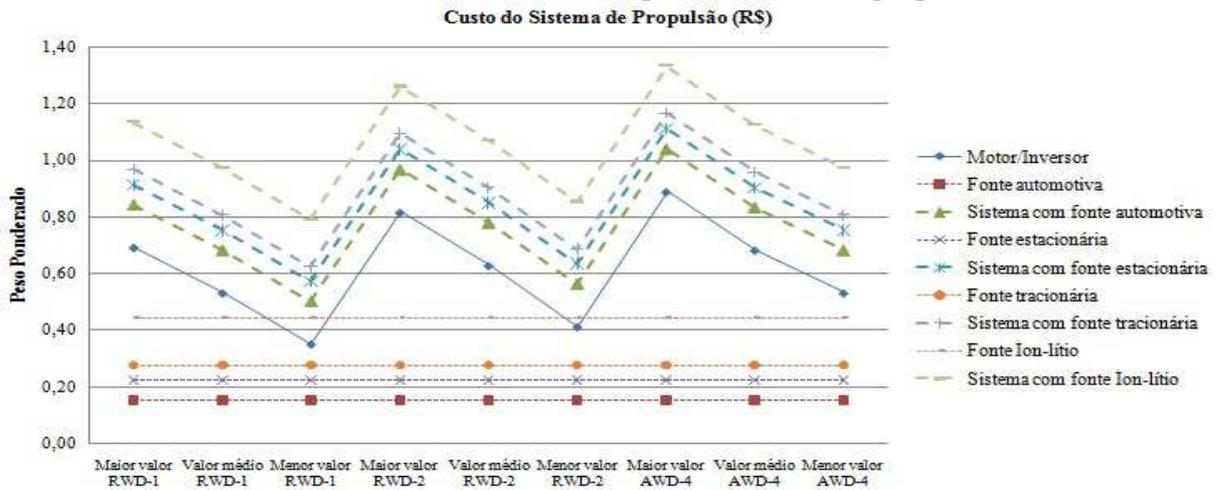
Ao examinar de forma paralela no eixo das possíveis alternativas de configuração de tração no gráfico 2, observa-se que apesar do conjunto motor elétrico/inversor para o trem de força do veículo apresentar um peso maior quando comparado ao conjunto motor de combustão interna/transmissão, com referência de peso ponderado de 1, o sistema de armazenamento de energia é o que mais contribui para o aumento no peso da carroceria do veículo.

Conforme resultados do Gráfico 2, uma configuração de tração com fonte de energia chumbo-ácido estacionária pode chegar a quatro vezes mais peso quando comparada ao sistema de propulsão com o motor de combustão interna, tornando-se uma alternativa inviável para a configuração.



Com comparações de forma semelhantes ao gráfico 2, o Gráfico 3 com o custo ponderado de 1 para o sistema de tração com motor de combustão interna, apresenta os custos de cada configuração do sistema de tração que possam atribuir ao veículo.

Gráfico 3 – Viabilidade de custo para o sistema de propulsão



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

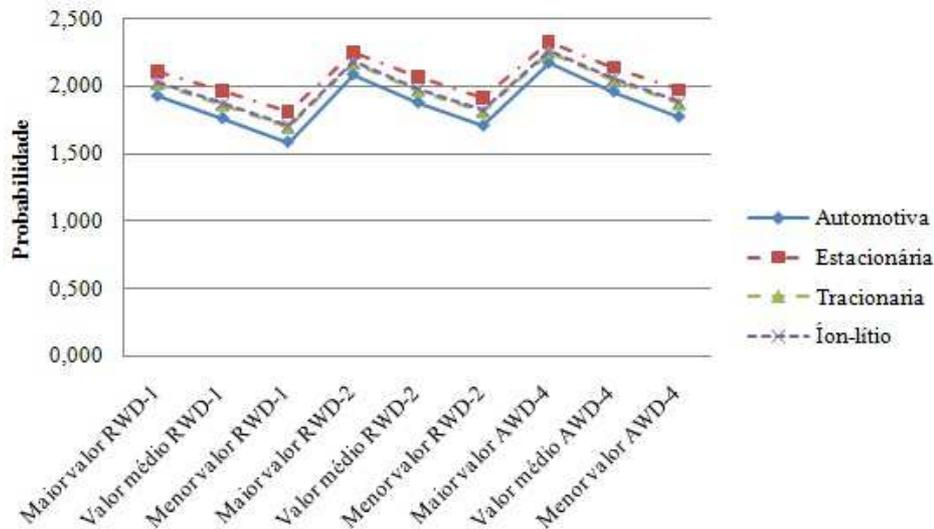
Após os resultados apresentados no Gráfico 3, verificando de forma paralela no eixo das configurações, iniciando na parte inferior para a parte superior pode ser identificado que em muitas das possíveis alternativas de configurações do sistema de tração a viabilidade econômica para um sistema de trem de força elétrica apresenta custos de manufatura inferiores quando comparado ao sistema de trem de força com motor de combustão interna.

Diante da divergência de resultados entre os gráficos 2 e 3 para custo e peso, o Gráfico 4, a seguir, apresenta a melhor alternativa para a configuração do sistema de propulsão através da equação 2.34 no axioma de informação, os resultados indicam que a melhor alternativa a ser escolhida esta condicionada na solução que possa apresentar a maior probabilidade para satisfazer o teor de informação mínimo para atender os requisitos do projeto, ou seja, um valor que indique a menor ponderação entre custo/peso atribuído no projeto.

Os resultados são apresentados de acordo com a ponderação do teor da informação de peso atribuído à carroceria e a viabilidade econômica explorada nos Gráficos 2 e 3.

Assim, ao ser observado de forma paralela ao eixo das configurações no gráfico 4, a configuração RWD-1 para o sistema de tração com fonte chumbo-ácido automotiva, apresenta a melhor solução para o projeto. No entanto, para a configuração com um propulsor, se torna necessário o uso de um sistema mecânico para compensação de velocidades em curvas que não apresente um sistema compacto e dependente do custo e peso do sistema mecânico que possa atribuir ao projeto.

Gráfico 4 – Seleção de alternativas
Parâmetro



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

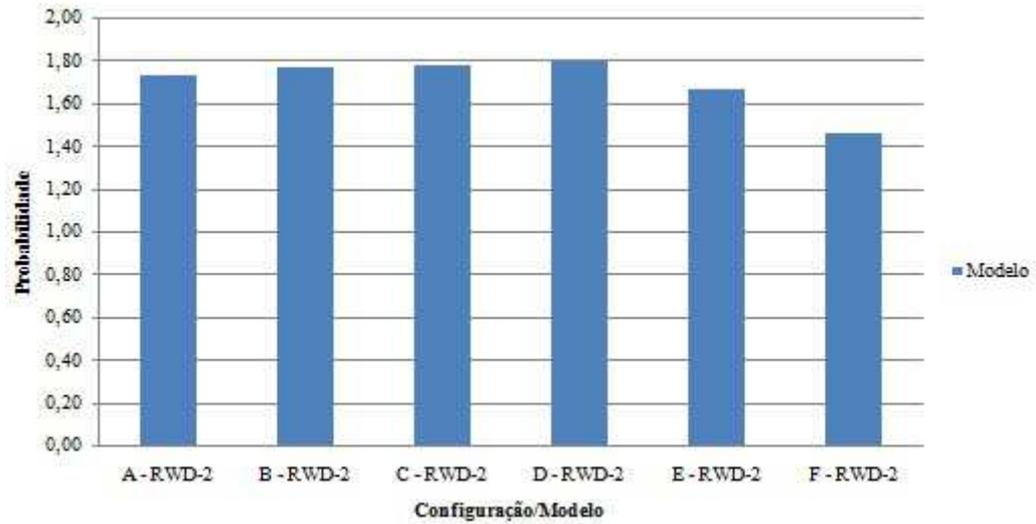
Dessa forma, a configuração recomendada se torna RWD-2 com fonte automotiva, pois seus resultados se apresentam inferiores aos demais, obtendo uma boa ponderação de custo e peso na configuração do subsistema.

. Sistemas independentes como a configuração RWD-2 e AWD-4 se apresentam mais compactos, pois não necessitam de um sistema de transmissão. No entanto, tem o peso mais elevado no veículo, assim como o custo de manufatura. Para sistemas independentes e para a compensação de velocidade das rodas, torna-se necessária a utilização de um sistema de controle lógico programável (CLP), que através de software possa controlar a rotação dos motores em condições de manobras, exigindo um sistema de comunicação preciso.

Os inversores de frequência foram avaliados de acordo com os dados técnicos de seus respectivos fabricantes através dos parâmetros de corrente nominal de saída, custo da configuração, peso e suas respectivas dimensões. O Gráfico 5, a seguir, apresenta a melhor alternativa para o inversor de frequência.

Conforme as possíveis alternativas de para a configuração de tração, todos os inversores mencionados no quadro 18 apresentam especificações técnicas para o controle do propulsor. Dessa forma, atributos de peso, dimensão, custo e comportamento dinâmico são fatores fundamentais para a melhor alternativa do inversor de frequência para realizar controle do propulsor.

Gráfico 5 – Alternativas para o inversor de frequência



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Para a melhor configuração, RWD-2, definida no Gráfico 4 e de acordo com a equação 2.34, o modelo de inversor de frequência para poder controlar os propulsores apresenta-se no modelo F, pois diante dos critérios de avaliação, apresentam-se com custo de configuração, dimensões e peso inferiores aos demais modelos com alta capacidade de corrente de saída.

6 CONCLUSÕES

Após o desenvolvimento desta pesquisa, pode se concluir que através do método de pesquisa axiomático e da análise morfológica é possível gerar um modelo alternativo para a configuração de um sistema de propulsão com equipamentos elétricos de propósitos gerais utilizados na indústria com fabricação em larga escala.

Com base nas características dinâmicas para um veículo e na manufatura de equipamentos elétricos em larga escala, foram identificados os principais equipamentos para o sistema de tração, como: motor elétrico, controlador/inversor de frequência e o modelo da fonte para o armazenamento de energia, assim como foram geradas três alternativas de configuração para propulsão.

As principais particularidades dos equipamentos, como conjugados médios, tempo de aceleração e tempo máximo de rotor bloqueado, tornaram-se elementos fundamentais para avaliação dos equipamentos, assim como potência, velocidade final, inclinação máxima de vias urbanas, peso atribuído à carroceria do veículo e custo de equipamentos. As alternativas para o armazenamento de energia levaram em consideração a energia necessária para o funcionamento do sistema e o modelo de tecnologia de fonte amplamente conhecida.

Os resultados obtidos na propulsão elétrica foram comparados ao modelo de propulsão com motor de combustão interna, realizando comparações, no Anexo B, de peso atribuído ao sistema de tração e viabilidade econômica. Assim, pode-se concluir que a viabilidade econômica de um subsistema de tração alternativo elétrico com equipamentos amplamente utilizados na indústria pode apresentar menores custos.

A configuração RWD-1 apresentou características de peso e viabilidade econômica inferiores aos modelos RWD-2 e AWD-4. No entanto, a exigência de um sistema mecânico para compensação de velocidades das rodas pode apresentar maiores custos e peso para a configuração.

Os modelos RWD-2 e AWD-4 apresentam uma configuração compacta. No entanto, a integração de um sistema de controle lógico programável para compensação de rotações dos motores se torna fundamental. Apesar de um sistema de controle lógico programável não apresentar peso elevado para o veículo, a viabilidade econômica e o comportamento dinâmico tornam-se fatores importantes para esse modelo de configuração.

Pode se concluir que de acordo com o equacionamento matemático teórico na configuração do sistema de propulsão, a escolha do modelo do propulsor, conforme suas características técnicas podem tornar-se um fator fundamental.

Com os resultados obtidos, entende-se que os objetivos para um subsistema de propulsão com características populares utilizando equipamentos industriais em larga escala foram ser atendidos. Deixa-se como sugestão a alternativa para o sistema de propulsão elétrica para um modelo de veículo elétrico urbano a configuração RWD-2, podendo estar configurada com os propulsores A ou B, com fonte de energia chumbo-ácido automotiva, sendo controlado pelo inversor/controlador de frequência de modelo F.

Sugere-se para a continuação deste trabalho realizar o estudo do comportamento dinâmico das configurações geradas, assim como a avaliação dinâmica dos modelos de controladores. Ainda, pode-se avaliar o comportamento do sistema utilizando um sistema de transmissão. Nos modelos RWD-2 e AWD-4, utilizam-se um sistema de controle lógico programável para a compensação de velocidades independentes dos propulsores.

Os resultados apresentados tiveram como base de cálculo dados inseridos em planilhas no Excel-2010, Sugere-se como continuação revalidar os dados em softwares específicos de estatísticas e que possam transmitir dados de consumo de energia e comportamento dinâmico dos equipamentos apresentados neste trabalho

Para a natureza de perspectivas futuras no desenvolvimento de veículos elétricos, estudos apontam que o desempenho, confiabilidade, durabilidade e baixo custo acreditam serem fatores fundamentais para a aceitação e disseminação dos veículos. Ainda para os equipamentos de propulsão, assim como, podendo aumentar a tensão de alimentação para o motor propulsor de indução e podendo haver modificações de design, o motor elétrico poderá melhorar sua eficiência.

Uma melhor definição de controle, seleção de semi-condutores para potência, baixo custo e integração de sistemas que possam suportar altos índices de ciclos e vibrações externas, indicam desafios para poder proporcionar aos inversores de frequência alta eficiência e sistemas robustos.

Atributos como densidade de potência, energia, ciclo de vida, peso, temperatura, volume e custo representam os principais fatores fundamentais futuros para o sistema de armazenamento de energia, e indica que o sistema de armazenamento de energia com fonte íon-lítio é a mais eficiente para o futuro próximo em veículos elétrico. No entanto, algumas pesquisas indicam que o sistema de armazenamento de energia com fonte de ar lítio tenderá ser o futuro para armazenamento de energia em veículos elétricos e híbridos devido a elevada densidade energética.

Muitas tecnologias indicam uma melhoria em pontos de carregamento de baterias para os veículos elétricos, alguns estudos para o futuro desenvolvem o conceito de sistema

universal combinado de carregamento de energia para a bateria, que consiste no veículo pode carregar a bateria em um sistema de energia em corrente alternada ou corrente contínua rápida utilizando o mesmo conector a estação de carregamento. Ainda, outros modelos de pontos de estação de carga podem oferecer sistema indutivo por um campo eletromagnético onde a bateria pode ser recarregada em um sistema de conexão sem fio.

REFERÊNCIAS

- AHMED, A.; BHUTIA, D. D. Propulsion System Design and Sizing of an Electric Vehicle. **IJEEE. International Journal of Electronics and Electrical Engineering**, v. 3, n. 1, p. 14-18, Feb. 2015. Disponível em: <<http://www.ijeee.net/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=40&id=141>>. Acesso em: 20 nov. 2015.
- ALVES, M. F. **ABC das máquinas elétricas**. Porto: ISEP, 2003.
- ARAÚJO, G. H. S. **Projeto de um veículo automotivo urbano de 2 lugares com propulsão elétrica**. 2011. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2011/Artigos/Art_TCC-_025_2011.pdf>. Acesso em: 5 dez. 2015.
- ARRABAÇA, D. A.; GIMENES, S. P. **Eletrônica de potência: conversores de energia**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 17094-1: Máquinas elétricas girantes – motores de indução – Parte 1: Trifásicos**. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS (ABVE). **Veículos elétricos**. 2016. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/downloads>>. Acesso em: 15 jun. 2016.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira**. 2015. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: 20 nov. 2015.
- _____. **Indústria automobilística e sustentabilidade**. Brasília: CNI, 2012. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2013/09/23/4970/20131002175420378115i.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2015.
- BALL, J. K.; STONE, R. **Automotive engineering fundamentals**. SAE International, 2004.
- BARAN, R. **A introdução de veículos elétricos no Brasil: avaliação do impacto no consumo de gasolina e eletricidade**. 2012. 139 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2012.
- BARASSA, E.; MELLO, F. L. C. Qual o futuro do carro elétrico? **Jornal da Unicamp**, Campinas, n. 627, 2015. Disponível em: <<http://www.unicamp.br/unicamp/ju/627/qual-o-futuro-do-carro-eletrico>>. Acesso em: 5 dez. 2015.
- BARBIERI, R.; CAMPATELLI, G. Investigation on optimal mobility system using Axiomatic Design and Scoring Matrix: the “Drive Ability” experiment. **ELSEVIER**, v. 34, Procedia CIRP 34, p. 180-185, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115008252>>. Acesso em: 5 dez. 2015.
- BARBOSA, F. A. S. **Controlo de tração em veículos elétricos**. 2013. 138 f. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) – Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.
- BARBOSA, G. **Campo magnético girante de máquinas CA**. 2013a. Apostila. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~gbarbosa/Disciplina%20de%20M%E1quinas%20El%E9>>

tricas/Disciplina%20de%20M%C3%A1quinas%20El%C3%A9tricas/apost03.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2015.

_____. **Máquinas assíncronas**. 2013b. Apostila. Disponível em: <http://www.cpdee.ufmg.br/~gbarbosa/Disciplina%20de%20M%20E1quinas%20El%E9tricas/Disciplina%20de%20M%C3%A1quinas%20El%C3%A9tricas/maquinas_assincronas.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2015.

BARRETO, G. **Veículo elétrico a bateria: contribuições à análise de seu desempenho e seu projeto**. 1986. 369 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1986.

BARROS, D. C.; CASTRO, H. R.; VEIGA, S. G. Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. **BNDES Setorial**, n. 37, p. 443-496, 2013. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3711.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2015.

BONATTO, L.; KINAS, J. R.; CAMPOS, M.; SAUSEN, P. S.; REIMBOLD, M. M. P.; SAUSEN, A. T. R. Z. **Development of an urban electric vehicle as multidisciplinary work in electrical engineering**. 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6785198&isnumber=6785077>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

BORSARI, V. **Caracterização das emissões de gases de efeito estufa por veículos automotores leves no Estado de São Paulo**. 2009. 204 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2009.

BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. 25. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Evolução da regulamentação de emissões atmosféricas de poluentes no ar**. 2012. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/atividade-legislativa/comissoes/comissoes-permanentes/cmads/audienciaspublicas/audiencia-publica-2014/3-4-2013-poluicao-atmosferica-nas-grandes-cidades/apresentacoes/rudolf-de-noronha/view>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **Compromisso pela qualidade do ar e saúde ambiental**. Brasília, 2009a. Disponível em: <www.mma.gov.br/estruturas/_arquivos/compromisso2_163.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2015.

_____. **Resolução do CONAMA n. 415, de 24 de setembro de 2009**. 2009b. Disponível em: <http://www.cntdespoluir.org.br/Documents/PDFs_Legislacao/res415_09.pdf>. Acesso em: 28 out. 2015.

_____. **Resolução do CONAMA n. 404, de 11 de novembro de 2008**. 2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=591>>. Acesso em: 28 out. 2015.

_____. **Resolução do CONAMA n. 003, de 28 de junho de 1990**. 1990. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html>>. Acesso em: 28 out. 2015.

_____. **Resolução do CONAMA n. 005 de 15 de junho de 1989**. 1989. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res89/res0589.html>>. Acesso em: 28 out. 2015.

_____. **Resolução do CONAMA n. 18, de 6 de maio de 1986.** 1986. Disponível em: <www.mma.gov.br/port/conama/res/rest86/rest1986.html>. Acesso em: 28 out. 2015.

_____. **Lei n. 6938, de 31 de outubro de 1981.** 1981. Define a Política Nacional do Meio Ambiente. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938compilada.htm>. Acesso em: 28 out. 2015.

_____. Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **Normas para projeto das estradas de rodagem.** 1973. Disponível em: <www.dnit.gov.br/download/rodovias/operacoes-rodoviaras/faixa-de-dominio/normas-projeto-estr-rod-reeditado-1973.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2015.

_____. Código Nacional de Trânsito. **Artigo 61.** 1997. 2. ed. – Brasília : Senado Federal. Subsecretaria de Edições Técnicas, 2009. 196 p.

BUENO, A. G. A. **Tração elétrica como alternativa para o transporte urbano.** 2004. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2004.

CANALE, A. C. **Automobilística dinâmica desempenho.** São Paulo: Érica, 1989.

CARNEVALLI, J. A. **Proposta de um modelo baseado no projeto axiomático para minimizar as dificuldades no uso do QFD.** 2007. 257 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), Santa Barbara D'Oeste, 2007.

CASTRO, A. K.; MONTEIRO, J. A. B. D. P.; TEIXEIRA, J. P. P.; SOARES, P. A. C. M.; BARBOSA, R. M. C.; CARVALHO, T. A. A. **Sistema de propulsão do automóvel.** 2009. Disponível em: <http://formsus.datasus.gov.br/novoimgarq/21159/-3366448_109700-.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2015.

CHAGAS, M. W. P. **Novas tecnologias para avaliação de baterias.** 2007. 97 f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Desenvolvimento de Tecnologia) – Instituto de Engenharia do Paraná (LACTEC), Curitiba, 2007.

CORRÊA, F. C. **Desenvolvimento e análise de estratégias de gerenciamento de potência em veículo elétrico híbrido de configuração paralela.** 2013. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2013.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Veículos elétricos.** 2016. Disponível em: <http://www.cnt.org.br/Imprensa/resultado_busca/ve%C3%ADculos%20el%C3%A9tricos>. Acesso em: 12 jan. 2016.

CROLLA, D. A. (Ed.) **Automotive engineering powertrain, chassis system and vehicle body.** 1. ed. Burlington: Elsevier, 2009. Disponível em: <<http://www.rmct.com/lib/Resources/EBooks/Mechauto/%5BBW%5D%20Automotive%20Engineering%20Powertrain,%20Chassis%20System%20and%20Vehicle%20Body.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

CROSS, N. **Engineering design methods.** 4. ed. England: WILEY, 2000.

DEL TORO, V. **Fundamentos de máquinas elétricas.** Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1994.

- DUQUE, E. D. **Desenvolvimento de um modelo de simulação do acoplamento da embreagem durante a partida do veículo**. 2010. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de engenharia Industrial, São Bernardo do Campo, 2010.
- ECKERT, J. J. **Análise comparativa entre os métodos de cálculo da dinâmica longitudinal em veículos**. 2013. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2013.
- EHSANI, M.; GAO, Y.; GAY, S. E.; EMADI, A. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**. EUA: CRC PRESS, 2004.
- ELECTRIC Vehicle News. The History of Electric Vehicles. **Electrobat**. 2010. Disponível em: <<http://www.eletricvehiclenews.com/Hitoryearly.htm>>. Acesso em: 27 nov. 2015.
- FERRAZ, C. V. **Sistemas controlados de propulsão de veículos automotores**. 2004. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2004.
- FIAT Automóveis S/A. **Fiat FCC II**. [2015a?]. Disponível em: <<http://www.fiat.com.br/sustentabilidade/produto/palio-weekend-eletrico.html>>. Acesso em: 28 nov. 2015.
- _____. **Palio Weekend elétrico**. [2015b?]. Disponível em: <<http://www.fiat.com.br/sustentabilidade/produto/palio-weekend-eletrico.html>>. Acesso em: 28 nov. 2015.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; KUSKO, A. **Máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1975.
- FOWLER, R. **Fundamentos de eletricidade: corrente contínua e magnetismo**. 7. ed. v. 1. Porto Alegre: AMGH, 2013. (Série Tekne).
- FRANCISCHETTI, C. E.; SANTOS, N. C.; SILVA, R. G. **Analysis of electric vehicles: a Brazilian reality and its consequences for the environment**. 2014. Disponível em: <<http://www.icrepq.com/icrepq'14/283.14-Francischetti.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2015.
- GEBALA, D. A.; SUH, N. P. An application of axiomatic design. **Research in Engineering Design**, v. 3, issue 3, p. 149-162, 1992.
- GENERAL MOTORS. **GM EV1**. 2010. Disponível em: <<https://carrocultura.wordpress.com/tag/gm-ev1/>>. Acesso em: 27 nov. 2015.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. USA: SAE-Inc., 1992.
- GUEDES, M. V. **Máquinas elétricas síncronas: arranque dos motores síncronos**. 2003. Dissertação. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2003.
- GURGEL MOTORES S/A. **História da Gurgel**. [2015?]. Disponível em: <www.gurgel800.com.br/historia/gurgelmotores.php>. Acesso em: 28 nov. 2015.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 12. ed. Porto Alegre, BOOKMAN, 2015.

HORI, Y.; MAEDA, K.; FUJIMOTO, H. Four-wheel driving-force distribution method for instantaneous or split slippery roads for electric vehicle with in-wheel motors. In: 12th IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCED MOTION CONTROL (AMC), **Anais eletrônicos...** Sarajevo, 2012, p. 1-6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6197053>>. Acesso em: 28 nov. 2015.

IEEE Recommended Practice for Sizing Lead-Acid Batteries for Stationary Applications. **IEEE Std 485-2010** (Revision of IEEE Std 485-1997), p. 1-90, 2010. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5751584&isnumber=5751583>>. Acesso em: 28 nov. 2015.

ILIE, N.; PETRU, T.; ESANU, V. Urban electric vehicles traction: achievements and trends. **ICEPE**, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (INEE). **Veículos elétricos e geração distribuída**. 2010. Disponível em: <www.inee.org.br/veh_gd.asp?Cat=-veh>. Acesso em: 6 dez. 2015.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION – **IEC. 60034-1**: Rotating Electrical Machines. Part 1: Rating And Performance, 2004. Disponível em: <<https://law.resource.org/pub/in/bis/S05/is.iec.60034.1.2004.pdf>>. Acesso em: 28 set. 2016.

ITAIPU BINACIONAL. **Infraestrutura**. Montagem do Renault Twizy no Brasil. 2014. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2014/11/itaipu-inicia-montagem-do-renault-twizy-no-brasil>>. Acesso em: 28 nov. 2015.

JOHNSON CONTROLS. **Treinamento técnico em baterias automotivas**. Sorocaba, 2008.

LANGANKE, R. **Poluição e direito ambiental**. [2015] Disponível em: <http://eco.ib.usp.br/lepac/conservacao/ensino/direito_poluicao.htm>. Acesso em: 2 dez. 2015.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. **Electric vehicle technology explained**. Wiley: Oxford, 2003.

LEÃO, P. C. A.; OLIVEIRA, J. C.; RODRIGUES, K. D. Conversores de frequência VSI-PWM submetidos a afundamentos temporários de tensão. **SPA**, Campinas, v. 14, n. 1, 2003.

LECHNER, G.; NAUNHEIMER, H. **Automotive transmissions**. Berlin: Springer, 1999.

LEE, K. D.; SUH, N. P.; OH, J. H. **Axiomatic design of machine control system**. 2001. Disponível em: <<http://web.mit.edu/pccs/pub/2001/klee-manufacturing.pdf>>. Acesso em: 2 dez. 2015.

LEE, S. H.; KIM, T. H.; AHN, J. W. Electric powertrain system for e-scooter with rear two in-wheeled propulsion motors. In: International Conference on. **Electrical Machines and Systems (ICEMS)**, Busan, 2013, p. 1491-1493. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6754416&isnumber=6713106>>. Acesso em: 2 dez. 2015.

LEE, T. **Complexity theory in axiomatic design**. 2003. 182 f. Tese (Doctor Mechanical Engineering) – Massachusetts Institute Of Technology, Estados Unidos, 2003.

LINKE, R. R. A. **O PROCONVE L6 e esboços para O L7**. 2009. Disponível em: <<http://www.aea.org.br/apresentacoes/020409/12h10%20-%20Renato%20Linke.pdf>>. Acesso em: 5 nov. 2015.

LOCH, E.; HENKES, J. A. Alternativas para reduzir a poluição gerada por automóveis a partir do uso de energias renováveis. **Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 3, n. 1, p. 565-583, 2014. Disponível em: <http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/2218/1598>. Acesso em: 02 dez. 2015.

LOUREIRO, M. **Motores de corrente contínua**. 2006. Disponível em: <http://www.marioloureiro.net/tecnica/electrif/Motores_CC_ind1.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2015.

LUKIC, S. M.; EMADO, A. **Modeling of electric machines for automotive applications using efficiency maps**. 2003. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1247945&isnumber=27951>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

MADUREIRA, O. M. **Dinâmica de veículos**. Apresentação e discussão dos fatos básicos. São Paulo: Escola Politécnica de São Paulo, 1995. Apostila.

MAGALHÃES, F.; FREITAS, J. P.; MAGALHÃES, J. F.; PEREIRA, N.; LEMOS, P.; PINHEIRO, T. **Motores de combustão interna**. 2009. Disponível em: <paginas.fe.up.pt/~projfeup/cd_2009_10/relatórios/R505.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2015.

MAHLE. **Manual técnico de motores de combustão interna**. 2012. Disponível em: <<http://www.mahle-aftermarket.com/media/local-media-south-america/download-center/technical-materials/manual-tecnico-curso-de-motores-miolo-846b-2.pdf>>. Acesso 20 nov. 2015.

MARQUES, L. S. B.; SAMBAQUI, A. B. K.; DUARTE, J. **Apostila de máquinas elétricas**. 2013. Disponível em: <<http://joinville.ifsc.edu.br/~sergio.alves/Material%20convers%C3%A3o%20energia/ApostilaMaq.pdf>>. Acesso em: 5 dez. 2015.

MARTINELLI, L. C. **Motores de combustão interna**. 2010. Disponível em: <<https://kaiohdutra.files.wordpress.com/2010/10/motores-de-combustao-interna3.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2015.

MASHAD, B.; CROLLA, D. **Vehicle powertrain systems**. Wiley: Noida, 2009.

MELLO, A. M.; MARX, R.; SOUZA, A. Exploring scenarios for the possibility of developing design and production competencies of electrical vehicles. **Int. J. of Automotive Technology and Management**, v. 13, n. 3, p. 289-314, 2013.

MERCEDES-BENZ. **Túnel de vento**. 2015. Disponível em: <<http://eblog.-mercedes-benz-passion.com/2010/01/the-large-wind-tunnel-in-unterturkheim>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

MOURA. Baterias Moura. **Produtos**. 2016. Disponível em: <<http://www.moura.com.br/produtos/>> Acesso em: 18 out. 2016

NATURAL RESOURCES CANADA (NRCAN). **AC Motors**. 2015. Disponível em: <www.rrcan.gc.ca/energy/-products/reference/15176>. Acesso em: 19 nov. 2015.

NOCE, T. **Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento**. 2009. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas), Belo Horizonte, 2009.

NOVA. **Motores trifásicos**. 2015. Disponível em: <<http://www.novamotores.com.br/motores/produtos/7>>. Acesso em: 23 nov. 2015.

PACONTROL. **Three-phase alternating current motors**. 2014. Disponível em: <www.pacontrol.com/3phasemotors1.html>. Acesso em: 20 nov. 2015.

PARK, G. J. **Analytic methods for design practice**. Hardcover, 2007

PINHEIRO, H. **Motores trifásicos de corrente alternada**. 2007. Disponível em: <<https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-e-acionamentos-eletricos/apostila-de-motores-trifasicos-de-ca>>. Acesso em: 19 nov. 2015.

PROCEL *et al.* **Motor elétrico: guia básico**. Brasília: IEL/NC, 2009. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/Motor_eletrico.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2015.

PUPO, A. S. Análise de possibilidades para a introdução de veículos elétricos no tráfego urbano da cidade de São Paulo: uma abordagem por meio da análise morfológica. **Future Studies Research Journal: Trends and Strategies**, v. 4, n. 2, p. 3-20, 2012.

RAJPUT, R. K. **A textbook of automobile engineering**. India: Price. 2007.

RESEK, A. J. J. **Fundamentos básicos de máquinas elétricas**. Rio de Janeiro: Synergia; Itajubá: Acta, 2011.

REVOREDO, T. C. **Modelagem e gerenciamento de potência de um veículo elétrico híbrido de célula a combustível**. 2007. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

SAE INTERNACIONAL. **Road load measurement and dynamometer simulation using coastdown techniques**. Warrendale, 2010.

SIEMENS. **Motores de corrente contínua**. 2006. Disponível em: <www.siemens.com.br/motores>. Acesso em: 20 nov. 2015.

SILVA, L. C. A.; ECKERT, J. J.; SANTICIOLLI, F. M.; COSTA, E. S.; DEDINI, F. G.; CORRÊA, F. C. **A study of battery power for a different electric vehicle propulsion system**. 2015. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7101449&isnumber=7101413>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

SILVEIRA, F. L. Inclinações das ruas e das estradas. **Física na Escola**, v. 8, n. 2, 2007. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num2/v08n02a04.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2015.

SMART BATTERY. **Lithiumion**. 2016. Disponível em: <www.smartbattery.com>. Acesso em: 10 out. 2016

SOUZA, J. A. X. **Motores de indução**. 2001. Disponível em: <www.geocities.ws/jaxs60/motor.html>. Acesso em: 21 nov. 2015.

SOZO, V. **Utilização da abordagem axiomática no processo de tomada de decisões pertinentes ao projeto conceitual de produtos**. 2002. 120 f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

SUH, N. P. Fundamentals of design and deployment of large complex systems: OLEV, MH, and Mixalloy. **Journal of Integrated Design & Process Science**, v. 16, n. 3, p. 7-28, 2012.

_____. **Axiomatic design: advances and applications**. Canada: Oxford University Press, 2001.

_____. **Designing-in of quality through axiomatic design**. 1995. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=387380&isnumber=8781>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

_____. **The principles of design**. New York, 1990.

SUSTAINABLE INNOVATIVE SOLUTIONS LIMITED (SISL). **Creating a sustainable competitive advantage with continuous systematic customer-driven innovation**. 2008. Disponível em: <<https://designforinnovation.wordpress.com/>>. Acesso em: 21 fev. 2016.

TABOREK, J. J. **Mechanics of vehicles**. Ohio: Penton Plaza Cleveland, 1957.

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.

TANIKAWA, M. G.; NETO, G. G. D.; SOUZA, R. R.; SILVA, L. C. A.; DELGADO, V. V.; DEDINI, F. G. **Desenvolvimento de novas configurações de sistema híbridos de motorização e análise de desempenho longitudinal veicular**. 2010. Disponível em: <<http://www.abcm.org.br/anais/conem/2010/PDF/CON10-1141.pdf>>. Acesso em: 22 de abr. 2016.

VASCONCELLOS, E. A. **Transporte e meio ambiente: conceitos e informações para análises de impactos**. 1. ed. São Paulo: Annablume, 2008.

VOGES. **Motores elétricos trifásicos**. 2015. Disponível em: <http://www.voges.com.br/_arquivos/motores/VTOP.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2015.

WEG INDÚSTRIAS S/A. **Motores elétricos: guia de especificações**. 2016. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletric-os-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2015.

_____. **Comando e proteção. Centro de treinamento a clientes**. Módulo 1. [2015?] Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/catalogo-weg-comando-e-proteca.html>>. Acesso 2 dez. 2015.

_____. **Guia de especificação de frequência.** 2004. Disponível em: <http://www.mundoelétrico.com/downloads/Guia_de_Aplicacao_de_inversores_de_Frequencia.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2016.

XUE, X. D.; CHENG, K. W. E.; CHEUNG, N. C. **Selection of electric motor drives for electric vehicles.** 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4813059&isnumber=4812967>>. Acesso em: 22 jan. 2016.

YE, H.; YANG, Y.; EMADI, A. **Traction inverters in hybrid electric vehicles.** 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6243442&isnumber=6243413>>. Acesso em: 22 jan. 2016.

LEGENDA:

Definição de requisitos e parâmetros para a matriz do projeto			
Níveis	Necessidades	FR - Requisitos Funcionais	DP - Parâmetros do projeto
1	Ambiental	FR1: Propor sistema de tração elétrica	DP1: Modelo de tração elétrica em veículos para aplicação em centros urbanos
2		FR11: Reduzir poluição	DP11: Sistema de propulsão sem emissões de gases poluentes
3		FR111: Atender normas ambientais	DP111: Baixo teor de gases poluentes
4		FR1111: Definir normas	DP1111: Resolução conama nº 415/2009
4		FR1112: Permitir novas especificações	DP1112: Modelo para novas especificações
3		FR112: Apresentar alternativa	DP112: Tração elétrica alternativa
4		FR1121: Proporcionar baixo custo	DP1121: Equipamentos de produção em larga escala
4		FR1122: Proporcionar popularidade	DP1122: Utilização do modelo em massa
3		FR113: Melhorar qualidade do ar	DP113: Redução de gases poluentes em centros urbanos
4		FR1131: Reduzir doenças respiratórias	DP1131: Qualidade do ar para a saúde
2	Configuração	FR12: Armazenar energia elétrica	DP12: Sistema acumulador de energia
3		FR121: Determinar capacidade de energia	DP121: Dependente da potência dinâmica necessária para o veículo
4		FR1211: Avaliar dinâmica do veículo	DP1211: Norma SAE J670
4		FR1212: Definir desempenho	DP1212: Dinâmica longitudinal
5		FR12121: Definir utilização	DP12121: Uso urbano conforme DNIT para inclinações máximas
3	Fonte de energia	FR122: Fornecer energia elétrica	DP122: Sistema de propulsão
4		FR1221: Definir alimentação	DP1221: Alimentação trifásico
5		FR12211: Definir nível de tensão	DP12211: Baixa tensão conforme NR.10
3		FR123: Garantir fornecimento de energia	DP123: Capacidade de armazenamento
4		FR1231: Obter autonomia	DP1231: Norma SAE J1634
4		FR1232: Definir tecnologia	DP1232: Convencional com baterias chumbo-ácidas
5		FR12321: Proporcionar nível de tensão	DP12321: Integrado série/paralelo
5		FR12322: Dispor recarga (estático)	DP12322: Rede elétrica convencional
5	FR12323: Dispor recarga (dinâmico)	DP12323: Sistema frenagem regenerativo	
2	Motores	FR13: Tracionar veículo	DP13: Tração por motor elétrico
3		FR131: Propor configuração de tração	DP131: Avaliação custo/benefício e distribuição de equipamentos
4		FR1311: Apresentar simplicidade	DP1311: Configuração de tração compacta
4		FR1312: Proporcionar desempenho	DP1312: Dados técnicos fornecidos em catálogos pelo fabricante
5		FR13121: Proporcionar velocidade/torque	DP13121: Compatível as leis municipais de tráfego urbanas.
3		FR132: Inverter direção de movimento	DP132 Polaridade elétrica
3		FR133: Mensurar tipo de tração	DP133: Motor assíncrono
4		FR1331: Definir tipo de motor	DP1331: Motor tipo gaiola de esquilo
5		FR13311: Proporcionar baixo custo	DP13311: Utilização de componentes industriais em massa
4		FR1332: Definir velocidade/torque	DP1332: Dados técnicos do fabricante
4	FR1333: Definir potência	DP1333: Dinâmicas do veículo	
2	Controlador	FR14: Controlar velocidade	DP14: Controle de velocidade por inversor de frequência
3		FR141: Alterar velocidade	DP141: Frequência de chaveamento para a carga
4		FR1411: Mensurar modelo para variação da velocidade	DP1411: Modulação PWM de frequência por fase
3		RF142: Identificar velocidade	DP142: Realimentação ao controlador
4		RF1421: Definir controle	DP1421: Controle vetorial por encoder
5		RF14211: Controlar configuração de tração	DP14211: Sistema independente
5		RF14212: Controlar sistema independente	DP14212: Controle por CLP
4		RF1422: Compensar velocidades de eixos	DP1422: Modelo de configuração de tração
5		RF14221: Compensar propulsor único	DP14221: Dependente do sistema mecânico (diferencial)
5		RF14222: Compensar propulsores independentes	DP14222: Dependente do sistema eletrônico (CLP)
4		RF1423: Controlar aceleração/desaceleração	DP1423: Sinal varistor na entrada analógica do inversor
5		RF14231: Definir tempo de aceleração	DP14231: Inferior a 80% do tempo de rotor bloqueado (trb)
3		RF143: Reduzir velocidade	DP143: Variação de frequência
3		RF144: Parar veículo	DP144: Sistema convencional por freios hidráulicos
3		RF145: Mensurar controlador	DP145: Avaliação da potência para a tração
4	RF1451: Definir inversor	DP1451: Avaliação técnica para o projeto conforme catálogos do fabricante	

ANEXO B – COMPARATIVO DE DADOS TÉCNICOS

Definição	Versão	Potência motor (kW)	Potência inversor (kW)	Torque motor (N.m)	Polos motor	Tensão motor (V)	Peso Motor/Inversor	Tensão inversor (V)	Corrente nominal de saída inversor (A)	Custo Motor/Inversor	Dimensão motor/inversor	Tensão de pico (fonte projeto) (V)	Corrente nominal (projeto) (A)	Potência consumida da fonte (projeto) (W.h)
Maior valor	RWD-1	37,00	37,00	3,36	6	380 - 660	1,63	380	92,00	0,69	0,82	537,401	35,24	18936,52
Valor médio	RWD-1	37,00	37,00	3,34	6	380 - 660	1,38	380	75,17	0,53	0,72	537,401	35,24	18936,52
Menor valor	RWD-1	37,00	37,00	3,33	6	380 - 660	1,17	380	65,00	0,35	0,62	537,401	35,24	18936,52
Maior valor	RWD-2	18,50	18,50	3,38	6	380 - 660	1,96	380	94,00	0,81	1,34	537,401	35,24	18936,52
Valor médio	RWD-2	18,50	18,50	3,37	6	380 - 660	1,57	380	78,33	0,63	1,25	537,401	35,24	18936,52
Menor valor	RWD-2	18,50	18,50	3,36	6	380 - 660	1,37	380	70,00	0,41	1,19	537,401	35,24	18936,52
Maior valor	AWD-4	9,20	11,00	3,40	6	380 - 660	2,14	380	104,00	0,89	2,41	537,401	35,24	18936,52
Valor médio	AWD-4	9,20	11,00	3,36	6	380 - 660	1,73	380	97,33	0,68	2,14	537,401	35,24	18936,52
Menor valor	AWD-4	9,20	11,00	3,33	6	380 - 660	1,40	380	88,00	0,53	1,92	537,401	35,24	18936,52

Tensão nominal célula (V)	Capacidade fornecida pelo fabricante (Ah)	Fonte chumbo-ácida (automotiva)						Fonte chumbo-ácida (estacionária)							
		Capacidade nominal célula (W.h)	Configuração N° string (Un.)	Peso fonte automotiva	Peso sistema com fonte automotiva	Custo fonte automotiva	Custo sistema com fonte automotiva	Tensão nominal célula (V)	Capacidade fornecida pelo fabricante (Ah)	Capacidade nominal célula (W.h)	Configuração N° string (Un.)	Peso fonte estacionária	Peso sistema com fonte estacionária	Custo fonte estacionária	Custo sistema com fonte estacionária
12	40	480	39,45	1,35	2,98	0,15	0,84	12	40	480	39,45	1,76	3,39	0,22	0,91
12	40	480	39,45	1,35	2,73	0,15	0,68	12	40	480	39,45	1,76	3,14	0,22	0,75
12	40	480	39,45	1,35	2,52	0,15	0,50 ⁷	12	40	480	39,45	1,76	2,93	0,22	0,57
12	40	480	39,45	1,35	3,31	0,15	0,97	12	40	480	39,45	1,76	3,72	0,22	1,04
12	40	480	39,45	1,35	2,92	0,15	0,78	12	40	480	39,45	1,76	3,33	0,22	0,85
12	40	480	39,45	1,35	2,72	0,15	0,56	12	40	480	39,45	1,76	3,13	0,22	0,63
12	40	480	39,45	1,35	3,50	0,15	1,04	12	40	480	39,45	1,76	3,90 ⁸	0,22	1,11
12	40	480	39,45	1,35	3,09	0,15	0,83	12	40	480	39,45	1,76	3,49	0,22	0,90
12	40	480	39,45	1,35	2,76	0,15	0,68	12	40	480	39,45	1,76	3,17	0,22	0,75

⁷ Configuração com menor custo (R\$) atribuído ao projeto.

⁸ Configuração com maior peso (N) atribuído ao projeto.

Tensão nominal célula (V)	Capacidade fornecida pelo fabricante (Ah)	Fonte chumbo-ácida (tracionária)						Fonte Íon-lítio							
		Capacidade nominal célula (W.h)	Configuração N° string (Un.)	Peso fonte tracionária	Peso sistema com fonte tracionária	Custo fonte tracionária	Custo sistema com fonte tracionária	Tensão nominal célula (V)	Capacidade fornecida pelo fabricante (Ah)	Capacidade e nominal célula (W.h)	Configuração N° string (Un.)	Peso fonte Íon-lítio	Peso sistema com fonte Íon-lítio	Custo fonte Íon-lítio	Custo sistema com fonte Íon-lítio
12	40	480	39,45	1,44	3,07	0,28	0,97	12	40	480	39,45	0,87	2,51	0,44	1,13
12	40	480	39,45	1,44	2,82	0,28	0,81	12	40	480	39,45	0,87	2,25	0,44	0,97
12	40	480	39,45	1,44	2,61	0,28	0,62	12	40	480	39,45	0,87	2,04 ⁹	0,44	0,79
12	40	480	39,45	1,44	3,39	0,28	1,09	12	40	480	39,45	0,87	2,83	0,44	1,26
12	40	480	39,45	1,44	3,01	0,28	0,90	12	40	480	39,45	0,87	2,44	0,44	1,07
12	40	480	39,45	1,44	2,81	0,28	0,69	12	40	480	39,45	0,87	2,24	0,44	0,85
12	40	480	39,45	1,44	3,58	0,28	1,16	12	40	480	39,45	0,87	3,02	0,44	1,33 ¹⁰
12	40	480	39,45	1,44	3,17	0,28	0,96	12	40	480	39,45	0,87	2,61	0,44	1,12
12	40	480	39,45	1,44	2,84	0,28	0,81	12	40	480	39,45	0,87	2,28	0,44	0,97

⁹ Configuração com menor peso (N) atribuído ao projeto.

¹⁰ Configuração com maior custo (R\$) atribuído ao projeto.