

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
ENGENHARIA MECATRÔNICA

GUSTAVO SERAFIM

ESTUDO DE DIMENSIONAMENTO DE UM *POWERTRAIN* ELÉTRICO WEG  
APLICADO A UM VEÍCULO BAJA SAE

Joinville  
2024

GUSTAVO SERAFIM

ESTUDO DE DIMENSIONAMENTO DE UM *POWERTRAIN* ELÉTRICO WEG  
APLICADO A UM VEÍCULO BAJA SAE

Trabalho apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica, no Curso de Engenharia Mecatrônica, do Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Dr. Dalton Luiz Rech Vidor

Joinville

2024

Dedico este trabalho a toda minha família que sempre forneceu suporte necessário para minha caminhada, em especial meus pais, minha irmã e minha noiva.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente meus pais, Lourival Serafim e Elaine Klettenberg Serafim, por nunca medirem esforços para me proporcionar essa oportunidade. Agradeço por sempre acreditarem no meu potencial e serem fonte de grandiosos ensinamentos. Sem vocês eu não teria conseguido.

Agradeço minha irmã Eduarda Serafim Bilk e meu cunhado Rubens Bilk pelas conversas, conselhos, risadas e por todo o incentivo que me deram.

Agradeço minha noiva e futura esposa Ana Maria Gesser. Saiba que você foi o combustível necessário para a finalização do meu curso! Obrigado por cada momento, cada risada, conversa, motivação e companheirismo! Você foi vital no meu sucesso.

Agradeço a meus sogros Raul Gesser e Rozelene S. dos S. Gesser, e meus cunhados Nilton P. Gesser e Gabriela E. Gesser por todo o carinho, apoio e ensinamentos.

Agradeço de modo geral toda minha família pelo apoio, mas agradeço principalmente minha tia Geovania Serafim, meu tio Aleksandro Luis Gonçalves e meu primo Dimitris Luis Gonçalves por terem me acolhido em seu lar durante minha vida acadêmica.

Agradeço aos meus amigos Ruan Marcos Xavier, Edson Alvin Kruger Junior, Karoline Domingos e Thais Corrêa Lima, Ildo R. de Souza Jr. pela parceria e apoio durante minha jornada acadêmica.

Agradeço aos amigos fundadores e integrantes da Equipe CTJ Baja UFSC pela oportunidade de ter feito parte do time, por todas as ricas experiências acumuladas e pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a UFSC Joinville, todo corpo técnico e docente que de alguma forma contribuiu para minha formação acadêmica e conseqüentemente para realização deste trabalho.

*“ A persistência é o caminho do êxito ”*

Charles Chaplin

## RESUMO

A inserção de veículos elétricos no mercado brasileiro não segue as perspectivas globais, devido às dificuldades para se encontrar modelos eficientes que suportem a falta de infraestrutura para o carregamento do conjunto de baterias. Pesquisas na área do desenvolvimento de veículos elétricos apontam que a solução para diminuir o custo e aumentar a eficiência se dá por encontrar novas tecnologias embarcadas ou desenvolver projetos com aplicações específicas, de modo a otimizar a performance com a tecnologia disponível atualmente. Considerando isso, pretende-se apresentar um estudo dimensional do modelo de tração elétrica utilizado em conjunto com um *powertrain* elétrico comercial WEG em um veículo baja SAE de modo a validar o projeto com base nas limitações impostas pelas premissas e requisitos do protótipo, gerar documento técnico para avaliação de projeto e contribuir para o desenvolvimento das equipes de competição. Resguardada as características do veículo baja, visa-se um modelo de avaliação passível de aplicação em outros projetos. O modelo de solução apontado seguirá a metodologia de desenvolvimento de produto e será fundamentado pelos cálculos dimensionais. Para tal propósito, elenca-se as características do veículo e os requisitos para seu funcionamento, faz-se a modelagem de um conjunto *powertrain* com base nas condições propostas e nas características do conjunto motor elétrico e inversor, por fim, avalia-se o modelo obtido em confronto com os requisitos do projeto proposto e o modelo atual utilizado em um veículo Baja SAE.

**Palavra-chave:** Veículo elétrico. Veículo baja. Tração elétrica.

## ABSTRACT

The introduction of electric vehicles into the Brazilian market does not follow global perspectives due to difficulties in finding efficient models that can cope with the lack of infrastructure for battery pack charging. Research in the field of electric vehicle development suggests that the solution to reduce costs and increase efficiency lies in finding new embedded technologies or developing projects with specific applications to optimize performance with the currently available technology. Considering this, a dimensional study of the electric traction model used in conjunction with a commercial WEG electric powertrain in an SAE Baja vehicle is intended to validate the design based on the limitations imposed by the prototype's premises and requirements, generate a technical document for project evaluation, and contribute to the development of competition teams. Given the characteristics of the Baja vehicle, the aim is to create an evaluation model that can be applied to other projects. The proposed solution model will follow the product development methodology and will be based on dimensional calculations. For this purpose, the vehicle's characteristics and operational requirements are listed, the modeling of a powertrain set is done based on the proposed conditions and the characteristics of the electric motor and inverter set, and finally, the obtained model is evaluated against the proposed project's requirements and the current model used in an SAE Baja vehicle.

**Keywords:** Electric vehicle. Baja vehicle. Electric traction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configurações VEH. . . . .	18
Figura 2 – Configurações VE. . . . .	19
Figura 3 – Motores para tração de VEs. . . . .	20
Figura 4 – Estrutura motor elétrico. . . . .	20
Figura 5 – (a) Eixos dos enrolamentos do estator trifásico; (b) Rotor tipo gaiola de esquilo. . . . .	21
Figura 6 – Circuito equivalente monofásico de um motor polifásico. . . . .	22
Figura 7 – Circuito equivalente monofásico desprezando perdas na magnetizante. . . . .	23
Figura 8 – Movimento de uma massa $M$ devido à ação de forças. . . . .	25
Figura 9 – Veículo percorrendo uma rampa. . . . .	26
Figura 10 – Fatores aerodinâmicos. . . . .	29
Figura 11 – Perfil de resistência a forma. . . . .	30
Figura 12 – Diagrama de forças no centro de massa com veículo em movimento. . . . .	31
Figura 13 – * . . . . .	31
Figura 14 – Estrutura simplificada PRODIP. . . . .	33
Figura 15 – Motor WEG WTE300-IND300. . . . .	36
Figura 16 – Curvas de Torque e Potência. . . . .	37
Figura 17 – WEG CVW300A0400D0NB66. . . . .	38
Figura 18 – CTJ Baja 01. . . . .	39
Figura 19 – Configuração com motor central. . . . .	40
Figura 20 – Conjunto de transmissão CTJ Baja 01. . . . .	41
Figura 21 – Configuração de transmissão e-baja. . . . .	42
Figura 22 – Protótipo CTJ e-baja . . . . .	45
Figura 23 – Gráfico Torque x Velocidade . . . . .	47

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Requisitos e-baja. . . . .	35
---------------------------------------	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficientes de atrito de rolamento . . . . .	28
Tabela 2 – Coeficientes de atrito estático . . . . .	32
Tabela 3 – Principais características do Motor . . . . .	36
Tabela 4 – Principais características CVW300. . . . .	38
Tabela 5 – Parâmetros CTJ Baja 01. . . . .	40
Tabela 6 – Parâmetros CTJ Baja 01. . . . .	44

## LISTA DE SÍMBOLOS

$w_e$	Velocidade síncrona ( $rad/s$ )
$w$	Velocidade rotor ( $rad/s$ )
$w_s$	Velocidade de escorregamento( $rad/s$ )
$f_s$	Frequência síncrona ( $Hz$ )
$p$	Número de pólos
$s$	Escorregamento
$\widehat{V}_1$	Tensão no enrolamento
$R_1$	Resistência circuito primário
$X_1$	Reatância circuito primário
$R_c$	Resistência núcleo
$X_m$	Reatância de dispersão
$R_2$	Resistência circuito secundário
$X_2$	Reatância circuito secundário
$\widehat{E}_2$	Tensão induzida no rotor
$\widehat{I}_1$	Corrente estator
$\widehat{I}_\psi$	Corrente de magnetização
$\widehat{I}_2$	Corrente no rotor
$P_g$	Potência no entreferro
$P_r$	Potência de perdas
$n_{fases}$	Número de fases do estator
$P_{mec}$	Potência mecânica
$F_e$	Força imposta na corpo teste
$F_L$	Força de reação
$F_M$	Força do corpo teste

$M$	Massa do corpo
$u$	Velocidade linear
$a$	Aceleração
$T$	Torque
$F$	Força
$r$	Raio
$r_M$	Raio do corpo
$\dot{\theta}$	Velocidade angular
$J$	Momento de inércia
$\ddot{\theta}$	Aceleração angular
$\eta_{mec}$	Eficiência mecânica
$P_c$	Potência no cubo
$Q_s$	Resistência a rampa
$G$	Força peso
$\alpha$	Ângulo da rampa
$Q_I$	Resistência de inércia
$Q'_I$	Inércia de translação
$Q''_I$	Inércia de rotação
$m$	Massa
$J$	Momento de inércia
$J_m$	Momento de inércia motor
$J_t$	Momento de inércia transmissão
$J_r$	Momento de inércia roda
$i_d$	Relação de transmissão do diferencial
$i_c$	Relação de transmissão
$r_d$	Raio dinâmico da roda

$\delta$	Inércia equivalente
$Q_r$	Resistência de rolamento
$f$	Coeficiente de atrito de rolamento
$Q_a$	Resistência aerodinâmica
$q$	Pressão aerodinâmica
$C_x$	Coeficiente de resistência aerodinâmica
$A$	Área da seção transversal
$v$	Velocidade
$\rho$	Densidade do fluido
$F_{m(v=0)}$	Força motriz para velocidades próximas de zero
$F_m^{max}$	Força motriz máxima
$F_{mI}^{max}$	Força motriz máxima eixo dianteiro
$F_{mII}^{max}$	Força motriz máxima eixo traseiro
$R'_I$	Força de reação eixo dianteiro
$R''_I$	Força de reação eixo traseiro
$\mu$	Coeficiente de atrito pneu-pista
$x$	Fator de distribuição de carga no eixo traseiro
$l$	Distância entre eixos
$h$	Altura do centro de massa
$G$	Peso do veículo
$g$	Aceleração gravitacional
$i_c^{max}$	Relação de transmissão máxima
$i_c^{min}$	Relação de transmissão mínima

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	<b>Objetivo geral</b>	<b>16</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
2.1	VEÍCULOS ELÉTRICOS	17
2.1.1	<b>Configurações encontradas</b>	<b>17</b>
2.2	MOTORES PARA TRAÇÃO VEICULAR	19
2.2.1	<b>Motores de indução com gaiola de esquilo</b>	<b>19</b>
2.3	DINÂMICA DE CARGA	24
2.4	DINÂMICA VEICULAR	25
2.4.1	<b>Resistência Mecânica</b>	<b>25</b>
2.4.2	<b>Resistência ao Aclive</b>	<b>26</b>
2.4.3	<b>Resistência de Inércia</b>	<b>27</b>
2.4.4	<b>Resistência ao Rolamento</b>	<b>28</b>
2.4.5	<b>Resistência Aerodinâmica</b>	<b>29</b>
2.5	FORÇA MOTRIZ	30
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>33</b>
3.1	PROJETO PRODIP	33
3.2	MVP E-BAJA	34
3.2.1	<b>Planejamento</b>	<b>34</b>
3.2.2	<b>Projeto informacional</b>	<b>35</b>
3.2.3	<b>Projeto conceitual</b>	<b>40</b>
3.2.4	<b>Projeto preliminar</b>	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÕES</b>	<b>45</b>
4.0.1	<b>Requisito 1: aclive 100%</b>	<b>46</b>
4.0.2	<b>Requisito 2: atingir 50 km/h</b>	<b>46</b>
4.0.3	<b>Consequências de projeto</b>	<b>46</b>
4.0.4	<b>Premissa 1 SAE e Premissa 2 CTJ Baja</b>	<b>48</b>
4.0.5	<b>Conjunto motor inversor</b>	<b>49</b>
4.0.6	<b>Considerações gerais</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>52</b>
	<b>ANEXO A – FOLHA DE DADOS MOTOR</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde o início da década de 1880 os veículos elétricos começaram a ser desenvolvidos e pode-se atrelar seu surgimento à invenção da primeira bateria de chumbo ácido, meio indispensável para que alimentar o motor. Contudo, devido à deficiência tecnológica da época, as pesquisas acabaram não se tornando viáveis, sendo retomadas após o lançamento do modelo Prius, da marca Toyota, com a utilização da tecnologia híbrida (MATULKA, 2014).

Segundo Paoli e Gül (2022), as vendas dos carros elétricos disponíveis no mercado mundial no ano de 2021 cresceram e alcançaram a marca de 6,6 milhões de exemplares, representando mais que o dobro das vendas do ano anterior. Porém, no Brasil, as vendas não acompanham o mesmo ritmo das vendas mundiais, devido aos altos preços e falta de infraestrutura para realizar a recarga das baterias.

Para que os veículos elétricos estejam cada vez mais inseridos no mercado brasileiro, seja para uso diário ou recreativo, é necessário que alcancem o esperado desempenho obtido, entre outros fatores, com o acionamento do veículo. Visto as expectativas levantadas pela Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) para 2035, se faz necessário um investimento alto em infraestrutura pública (ANFAVEA, 2021), desta forma com acionamento eficiente pode-se evitar depender de investimentos públicos para inserir veículos elétricos no mercado nacional.

O desenvolvimento de veículos que atendam as expectativas de evolução tecnológica do mercado atual e futuro acontecem, também, dentro das instituições universitárias com as pesquisas de equipes de concepção, criação, construção e aperfeiçoamento de veículos - como a Equipe CTJ Baja do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) - da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A Equipe CTJ Baja UFSC foi criada em 2018, sendo coordenada, à época pelo Dr. Modesto Hurtado Ferrer e era composta por 12 estudantes. Passados cinco anos, são 25 componentes, dos cursos de Engenharia Automotiva, Mecatrônica, Ferroviária e de Bacharelado em Ciência e Tecnologia.

A Equipe CTJ Baja já participou de quatro competições: a primeira, de caráter nacional (2019), em que a equipe participou apenas para conhecer a competição; a segunda, de regime regional sul brasileiro (2019), envolvendo os estados de Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, no qual a equipe alcançou a 18ª colocação com a conclusão de 87,5% da prova de enduro (prova mais desejada e dura da competição) ; a terceira em nível nacional (2020), alcançando a 48ª colocação; por fim, competição regional de 2020 e 2022, em que a equipe alcançou a 9ª e 16ª colocação respectivamente (BAJA, 2018).

Devido aos resultados apresentados nesse início da sua história a equipe CTJ Baja UFSC foi convidada pela SAE Brasil (Sociedade dos Engenheiros da Mobilidade do Brasil) juntamente com a WEG S.A para desenvolver um dos primeiros protótipos de baja elétrico do Brasil.

Movidos por este desafio, o presente trabalho busca estudar o dimensionamento o conjunto de *powertrain* elétrico fornecido pela WEG S.A quando aplicado ao protótipo atual da equipe CTJ Baja UFSC dando origem ao e-baja. Isso será feito elencando as características do veículo e os requisitos para seu funcionamento, de acordo com as normas exigidas pela SAE Brasil, após faz-se a modelagem da carga e do acionamento com base nos requisitos levantados e nas características do inversor e motor disponíveis, e por fim, verificar e validar a solução de aplicação proposta.

## 1.1 OBJETIVOS

Para resolver a problemática e analisar um modelo de acionamento elétrico que atenda as especificações, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a aplicação de um conjunto *powertrain* elétrico comercial a um protótipo Baja SAE de acordo com os requisitos e limitações do projeto e a estrutura desenvolvida pela equipe.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar um modelo metodológico para levantar os requisitos e avaliar os resultados do projeto;
- Gerar documentação fundamentada para servir de base para a equipe reavaliar ou desenvolver novo projeto;
- Contribuir para o desenvolvimento de projetos e crescimento técnico equipes de competição.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS

O carro elétrico surgiu antes mesmo dos primeiros veículos a combustão e da gasolina. Em 1837, Robert Davison Aberdeen fabricava uma carruagem elétrica utilizando uma bateria de ferro-zinco e um motor elétrico, sendo este um dos precursores da mobilidade elétrica. O veículo elétrico (VEs ou EVs, da sigla em inglês Electric Vehicles) alcançou seu ápice no entre 1890 e 1910 quando já era possível encontrar veículos de passeio e transporte de cargas ou pessoas de diversas marcas e variados modelos.

Porém, com a descoberta do petróleo no início do século XX e a facilidade na destilação para obtenção da gasolina e diesel, a utilização da tração elétrica começou a perder força para os motores de combustão interna que demonstraram maior autonomia, velocidade e custo-benefício. Na década de 70, o aumento expressivo da poluição nos grandes centros urbanos e a crise do petróleo estabelecem o retorno dos VEs e dos estudos em novas tecnologias para tração elétrica (BOTTURA; BARRETO, 1989).

O retorno do VEs de forma efetiva no mercado mundial atual ocorreu após o lançamento do veículo elétrico híbrido (VEH) - Toyota Prius - em 1997 no Japão e em 2000 para o mercado mundial com a combinação da utilização de um motor a combustão e um motor elétrico, tornando-se o primeiro VEH produzido e vendido em grande escala.

Atualmente, o desenvolvimento de veículos elétricos é possível devido aos avanços tecnológicos na eletrônica de potência, na concepção de novas baterias e na fabricação de motores, e principalmente impulsionado pela necessidade de redução de poluentes derivados do petróleo (MATULKA, 2014).

#### 2.1.1 Configurações encontradas

Pode-se separar os modelos de tração elétrica em duas grandes categorias: VE e VEH. Os VEH são veículos que além de todo o sistema elétrico possui, também, um motor a combustão interna associado ao motor elétrico nas formas paralela, em série e série/paralelo como pode ser visto na Figura 1, enquanto os VEs possuem configurações utilizando um único motor central, um motor por eixo ou motores independentes para cada roda Figura 2.

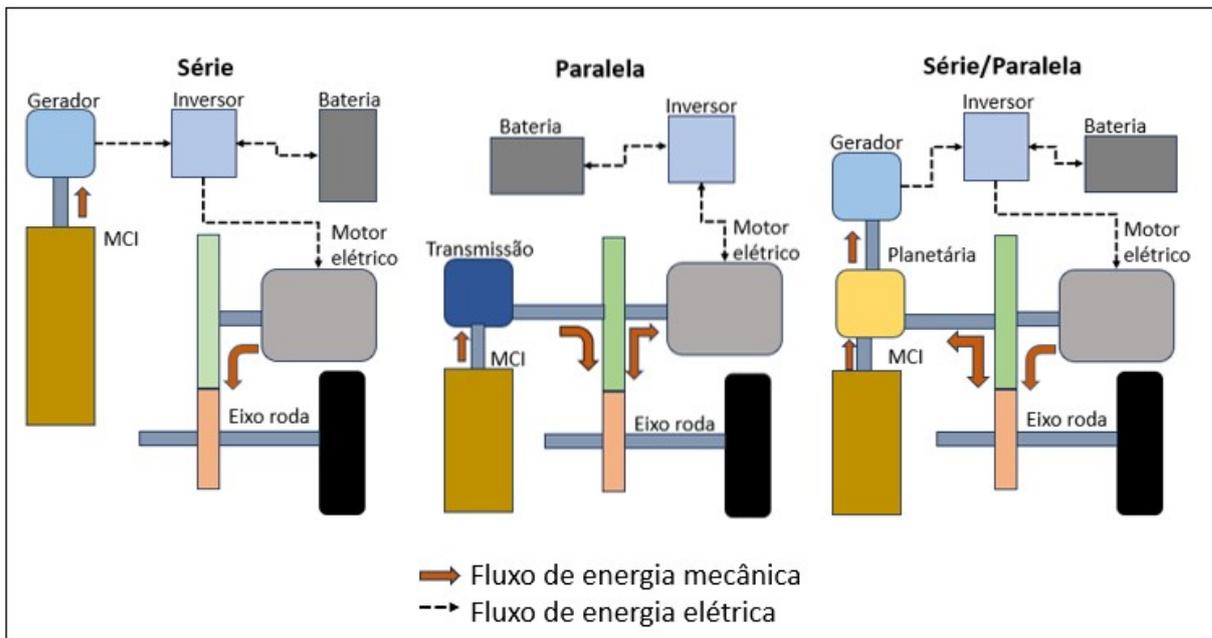
Em VEH série, o motor elétrico está ligado em série com a transmissão do veículo tornando-se a única forma de transmissão de potência para as rodas do veí-

culo. Nesse caso, o motor de combustão interna (MCI) é acoplado a um gerador e tem apenas a função de reabastecer as baterias do veículo.

Nos modelos paralelos tanto o MCI quanto o motor elétrico estão acoplados ao sistema de transmissão, dessa forma o motor elétrico além de auxiliar no fornecimento de potência para a tração também é responsável pela regeneração e carregamento das baterias.

Por fim, a configuração série/paralelo tem o mesmo princípio do modelo paralelo com o acréscimo de um gerador ligado em série com o MCI, dessa forma por meio de um conjunto de engrenagens a potência do MCI é distribuído para a transmissão ou para os geradores de acordo com a necessidade.

Figura 1 – Configurações VEH.



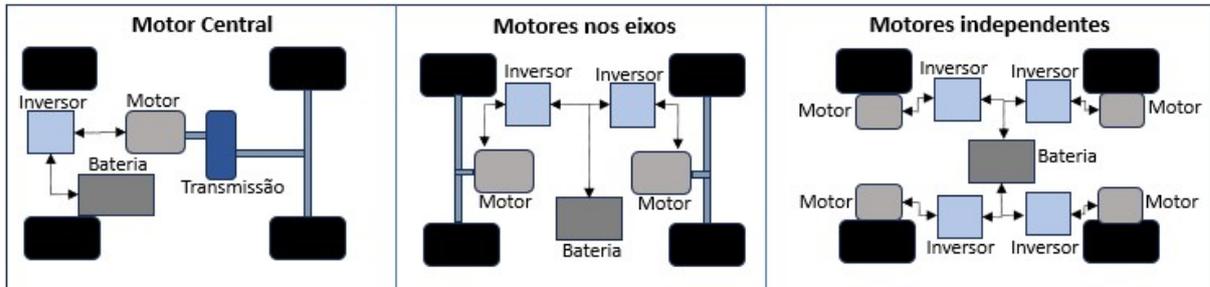
Fonte: Adaptado de Husain (2003).

Para os VEs, o modelo com um único motor central é o que mais se assemelha aos veículos a combustão, tornando-se o modelo de menor complexidade quando comparado às demais configurações e por esse motivo é a disposição com maior utilização, entretanto devido as configurações de acoplamentos existentes a que utiliza motor central é a que possui menor eficiência quando comparado aos demais modelos.

A configuração com motores independentes exige um controle de maior complexidade para os motores, porém oferecem maior desempenho e eficiência em virtude dos motores se encontrarem ligados diretamente às rodas. Devido ao alto desempenho dessa configuração é possível encontrar esse arranjo somente em alguns supercarros ou carros de luxo.

Deste modo, a configuração com motores nos eixos encontra o meio termo entre os dois arranjos anteriores integrando alguns modelos de veículos premium.

Figura 2 – Configurações VE.



Fonte: Adaptado de NeoCharge (2022).

A disposição dos motores que compõem os VEs é escolhida de acordo com a necessidade de cada projeto e, devido às necessidades de cada projeto, pode ser possível encontrar veículos que mesclam os arranjos mostrados a fim de obter melhores características.

## 2.2 MOTORES PARA TRAÇÃO VEICULAR

Diversos tipos de motores elétricos são utilizados para tração de veículos, como nos mostra o diagrama da Figura (Motores para tração de VEs). Os motores de corrente contínua (CC) são utilizados para veículos de pequeno porte e veículos de carga industriais, como pequenas empilhadeiras e rebocadores, quando não há necessidade de altas potências. Para demais aplicações é comum encontrar a utilização de motores de corrente alternada (CA) devido ao melhor custo-benefício que esses motores têm em relação aos seus equivalentes em CC.

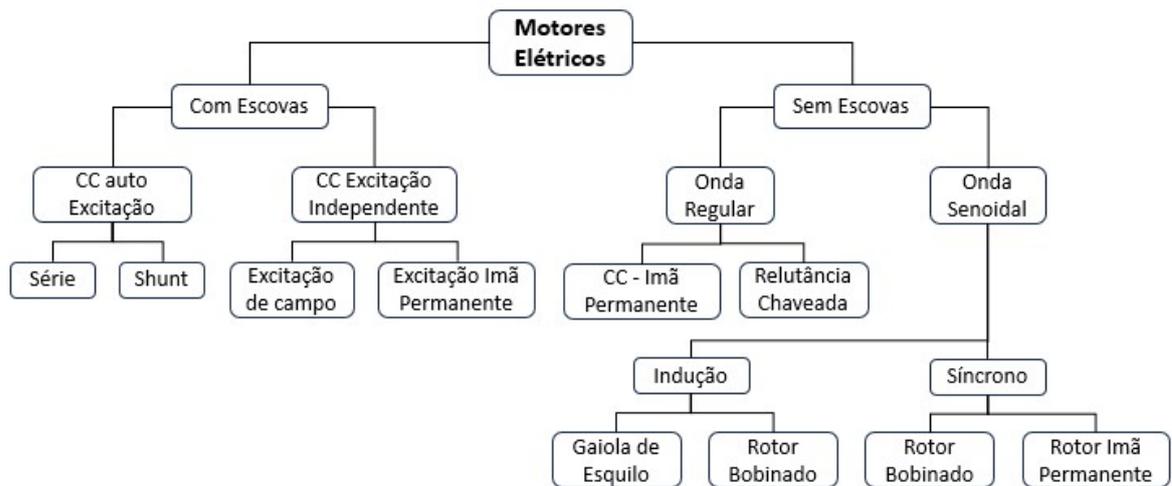
### 2.2.1 Motores de indução com gaiola de esquilo

Motores de indução CA com gaiola de esquilo são as máquinas elétricas polifásicas muito utilizadas quando a aplicação exige operações com velocidade variável. “Os motores de indução com rotores do tipo gaiola de esquilo são os cavalos de tração da indústria por causa de seu baixo custo e resistente construção” (MOHAN, 2015)

É constituído basicamente de 2 partes: estator e rotor (Figura 4). O estator consiste de enrolamentos polifásicos, geralmente trifásicos, responsáveis por gerar o campo magnético girante dispostos de modo equidistante.

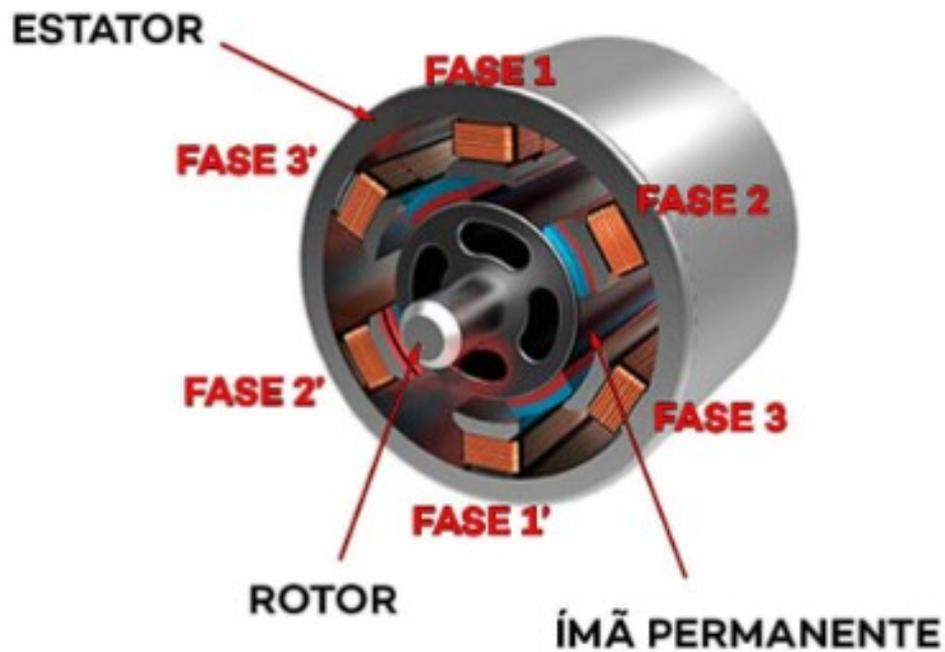
Cada enrolamento está fisicamente posicionado a  $120^\circ$  (Figura 5a) de distância dentro de ranhuras de uma material ferromagnético - para um motor trifásico -, vale ressaltar que para ser possível gerar campo cada fase necessita de pelo menos um par de pólos. Por fim, o rotor são barras de alumínio ou cobre curto circuitadas

Figura 3 – Motores para tração de VEs.



Fonte: Adaptado de Costa (2009).

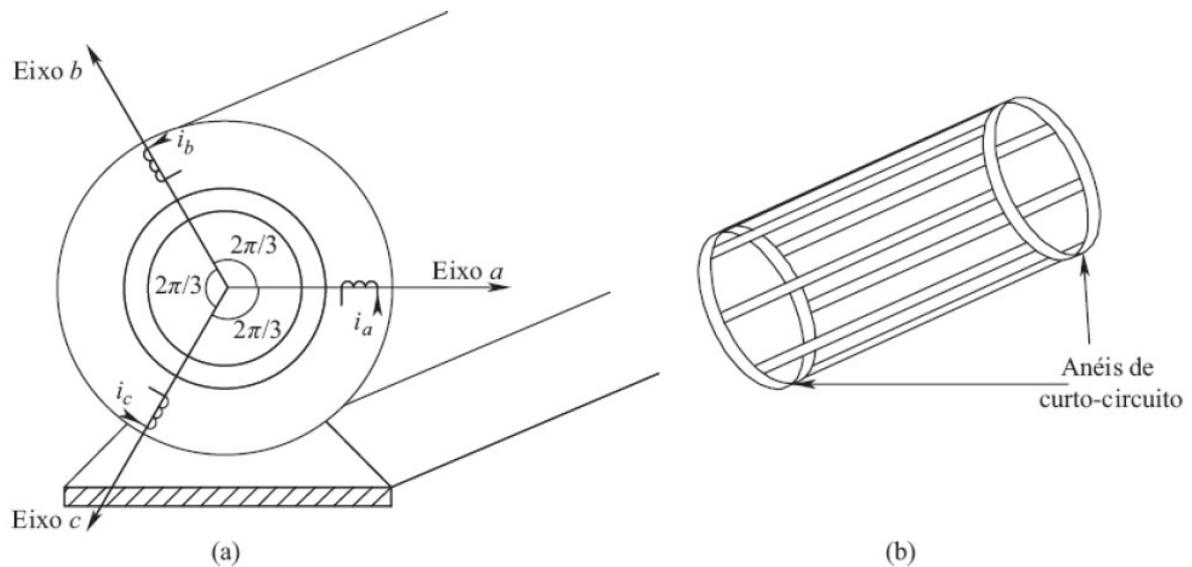
Figura 4 – Estrutura motor elétrico.



Fonte: NeoCharge (2022).

em suas extremidades (Figura 5b), formando uma gaiola de esquilo, preenchidos por chapas ferromagnéticas estampadas e isoladas entre si.

Figura 5 – (a) Eixos dos enrolamentos do estator trifásico; (b) Rotor tipo gaiola de esquilo.



Fonte: Mohan (2015).

Quando as bobinas da Figura 5a são alimentadas, cria-se um campo magnético resultante da interação das três tensões impostas nos enrolamentos do estator e por consequência das variações de amplitude de cada senoide o campo inicia um movimento de rotação, por esse motivo o campo resultante é chamado de campo girante.

O campo girante atravessando as barras condutoras irá induzir tensões e consequentemente corrente nos condutores do rotor de mesma forma que um circuito primário induz tensão e corrente no circuito secundário de um transformador. Desta forma, pode-se escrever o circuito equivalente de uma das fases do motor como mostrado na Figura 6.

Como o campo girante é o resultado da interação das 3 fases de alimentação, a velocidade com o qual ele gira é dependente apenas da velocidade das ondas senoidais, que por sua vez depende apenas da frequência da onda (frequência síncrona ou frequência elétrica ( $f_s$ )), e do número de polos de cada fase ( $p$ ). Como resultado da Equação 1 obtém-se a velocidade do campo, chamada de velocidade síncrona velocidade elétrica ( $w_e$ ).

$$w_e = 2\pi f_s / p \quad (1)$$

Quando o campo girante possui velocidade diferente de zero, a corrente imposta nas barras condutoras do rotor cria um campo que tentará sempre estar alinhado com o campo girante, dando origem ao torque que fará o rotor adquirir movimento. Com isso, é possível ver que se os campos do rotor e do estator estiverem alinhados

não haverá torque, por esse motivo para manter o rotor em movimento é necessário que a velocidade do rotor ( $w$ ) seja sempre menor que a velocidade síncrona, o que de fato acontece devido ao atrito interno da máquina. A diferença entre as velocidades síncrona e do rotor é chamada de velocidade de escorregamento ( $w_s$ ) que pode ser representada como uma fração da velocidade síncrona ( $s$ ).

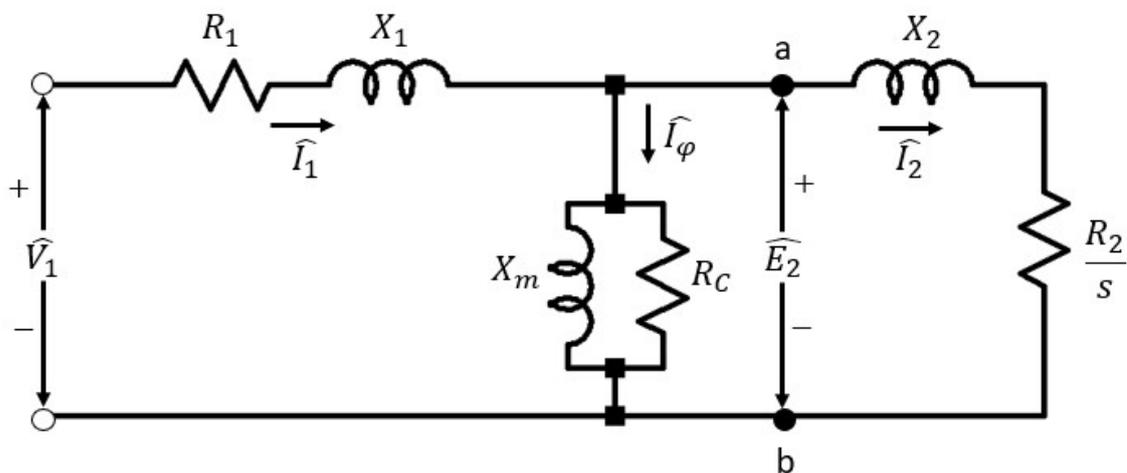
$$w_s = w_e - w \quad (2)$$

$$s = (w_e - w)/w_e \quad (3)$$

$$w = (1 - s)w_e \quad (4)$$

Com o motor alimentado com as fases equilibradas e em tensão e frequência ( $\widehat{V}_1$ ) pode-se analisar o circuito do motor separando por fase. Desta forma, pode-se representar a indução do estator sobre o rotor como um transformador por meio do circuito equivalente mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Circuito equivalente monofásico de um motor polifásico.

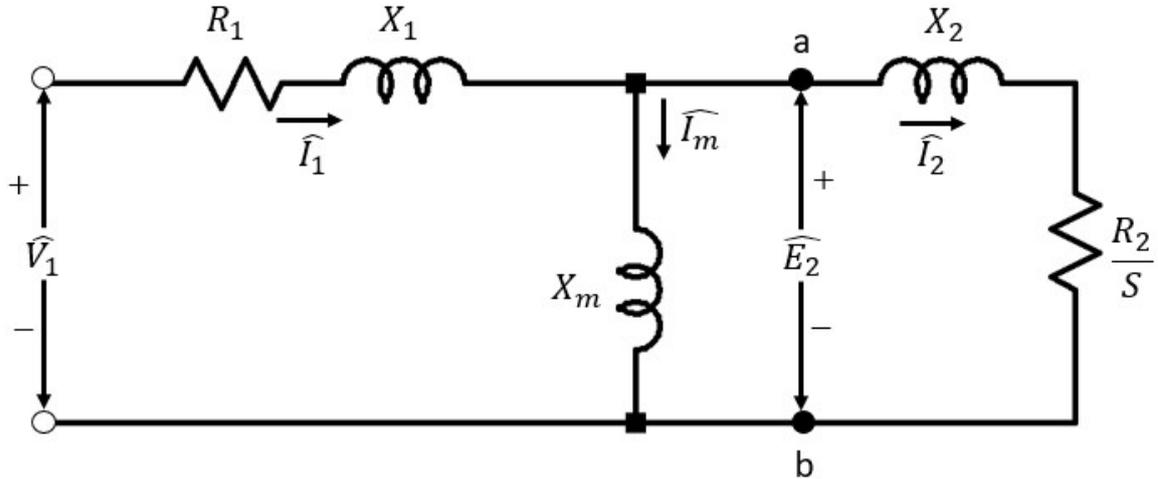


Fonte: Adaptado de Fitzgerald et al. (2006).

No circuito primário tem-se  $R_1$  e  $X_1$  resistência efetiva e reatância de dispersão respectivamente compondo a componente de carga do estator;  $R_c$  para resistência de perdas no núcleo e  $X_m$  para a reatância da componente de excitação (magnetização). Já para o circuito secundário  $R_2$  e  $X_2$  será a resistência e reatância do rotor.

Nota-se que a corrente do estator ( $\hat{I}_1$ ) é decomposta de forma que parte da sua magnitude é usada para o fluxo de magnetização do entreferro ( $\hat{I}_\psi$ ) e o restante ( $\hat{I}_2$ ) para gerar a força magnetomotriz no rotor.

Figura 7 – Circuito equivalente monofásico desprezando perdas na magnetizante.



Fonte: Adaptado de Fitzgerald et al. (2006).

Explorando o circuito da Figura 6 desprezando as perdas na magnetizante  $R_c = 0$  pode-se reorganizar o circuito equivalente para chegar no circuito da Figura 7.

De acordo com a nova configuração pode-se calcular as potências do motor de forma que, a potência transferida no entreferro ( $P_g$ ) e a potência das perdas no rotor ( $P_r$ ) sejam calculadas pela Equação 5 e Equação 6 respectivamente, em que  $n_{fases}$  é o número de fases do estator.

$$P_g = n_{fases} I_2^2 R_2 / s \quad (5)$$

$$P_r = n_{fases} I_2^2 R_2 \quad (6)$$

A Equação 7 calcula a potência eletromagnética total ( $P_{mec}$ ) subtraindo as perdas no rotor ( $P_r$ ) da potência entregue no entreferro ( $P_g$ ) multiplicado pelo número de fases do estator ( $n_{fases}$ ).

$$P_{mec} = P_g - P_r = n_{fases} (I_2^2 R_2 / s - I_2^2 R_2) \quad (7)$$

Rearranjando os termos da Equação 7 é possível reescrever as potências com base no escorregamento.

$$P_{mec} = n_{fases} I_2^2 R_2 (1 - s) / s \quad (8)$$

$$P_{mec} = (1 - s)P_g \quad (9)$$

$$P_r = sP_g \quad (10)$$

### 2.3 DINÂMICA DE CARGA

Adota-se que uma força  $F_e$  atua sobre um corpo de massa  $M$  para move-lo em uma direção linear  $x$  com uma velocidade  $u = dx/dt$ , como mostrado pela Figura 8a. Tal força encontra resistência ao movimento devido a força  $F_L$  de reação da carga. Sabe-se que o momento de inércia associado a massa da carga é definido como  $M$  vezes  $u$ , e de acordo com a Lei de Newton do Movimento, a força necessária para mover a carga  $F_M$  (Figura 8b) é igual a variação temporal do momento de inércia.

$$F_M = F_e - F_L \quad (11)$$

$$F_M = \frac{d}{dt}(Mu) = M \frac{du}{dt} = Ma \quad (12)$$

Como a massa  $M$  do corpo é fixa, na Equação 12, a variação da velocidade no tempo é representada pela aceleração  $a$  em  $m/s^2$  que pode ser reescrita como mostrado na Equação .

$$a = \frac{F_M}{M} \quad (13)$$

De forma análoga é possível reescrever a Equação 12 que descreve o movimento linear de acordo com sua correspondente rotacional, em que a força necessária para girar um corpo de massa  $M$  e de raio  $r_M$  em uma velocidade  $w_M$  é representada pelo torque  $T$ .

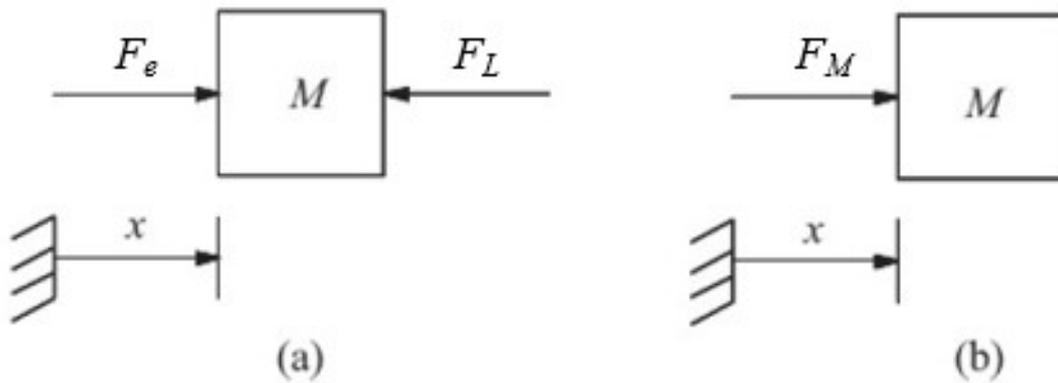
$$T = Fr \quad (14)$$

$$u = r\dot{\theta} \quad (15)$$

$$T = J \frac{d\dot{\theta}}{dt} \quad (16)$$

A Equação 14 representa o torque estático em que  $F$  é uma força aplicada de forma perpendicular a uma alavanca de raio  $r$ . Já a Equação 16, representa o torque temporal em que  $J$  é o momento de inércia e a contribuição da carga quando o velocidade angular ( $\dot{\theta}$  em  $rad/s$ ) varia no tempo. Dessa forma define-se a variação temporal da velocidade angular no tempo como a aceleração angular ( $\ddot{\theta}$  em  $rad/s^2$ ).

Figura 8 – Movimento de uma massa  $M$  devido à ação de forças.



Fonte: Adaptado de Mohan (2015).

$$\ddot{\theta} = \frac{d\dot{\theta}}{dt} \quad (17)$$

Portanto, a força necessária para mover o corpo será a diferença entre a força aplicada e a força de carga, que pode ser escrita como a somatória de todas as forças que se opõe ao movimento pretendido.

## 2.4 DINÂMICA VEICULAR

De acordo com Nicolazzi et al. (2012), a dinâmica veicular estuda as forças que atuam sobre um veículo durante toda sua movimentação, seja favorável ou em oposição ao movimento. O estudo das cargas inicia pelos pneus e segue para freios, carroceria, suspensão e leva em consideração o perfil de movimento ou trajetória ao qual o veículo está inserido.

As primeiras cargas estudadas devem ser as resistências ao movimento, ou seja, forças de oposição ao movimento que definem a força necessária para manter o veículo em movimento. Divido em cinco, os tipos de resistências atuantes são: mecânica, ao aclone, de inércia, de rolamento e aerodinâmica (NICOLAZZI et al., 2012).

### 2.4.1 Resistência Mecânica

A resistência mecânica é a perda de potência entre a saída do eixo do motor e o cubo de roda e pode ser vista como a eficiência dos sistemas que transmitem

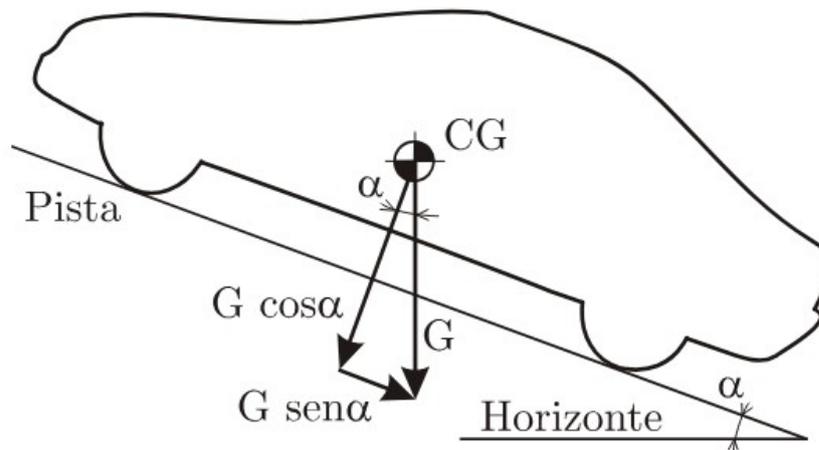
o torque do motor para as rodas. Ela considera as perdas por atrito, vibrações e até mesmo a viscosidade dos fluidos lubrificantes presentes em tais mecanismos. A Equação 18 descreve a relação entre a potência do motor  $P_{mec}$  e a potência do cubo  $P_c$  de acordo com a eficiência mecânica  $\eta_{mec}$ .

$$P_{mec} = \eta_{mec} P_c \quad (18)$$

#### 2.4.2 Resistência ao Aclive

Quando um veículo está sujeito a uma rampa, apenas uma parcela de seu peso é absorvido e transformado em força normal, a parcela restante atua no centro de massa (CG) impondo uma componente de força paralela ao piso da rampa conforme pode-se ver na Figura 9 (NICOLAZZI et al., 2012).

Figura 9 – Veículo percorrendo uma rampa.



Fonte: Adaptado de Nicolazzi et al. (2012).

De acordo com Nicolazzi et al. (2012), quando o veículo está sujeito a um aclive e o ângulo  $\alpha$  da rampa é positivo, a força da Equação 19 representa a resistência que deve ser superada para que o veículo de peso  $G$  não se mova para trás. Quando o ângulo da rampa é negativo, a força é a favor da movimentação do veículo facilitando sua movimentação.

$$Q_s = G \sin \alpha \quad (19)$$

Quando se trata de aclives, a literatura utiliza a porcentagem para fazer referência ao ângulo do aclive, sendo ela a tangente do ângulo da rampa. Com isso, um aclive com 100% de inclinação representa uma rampa com ângulo de  $45^\circ$ .

### 2.4.3 Resistência de Inércia

Em acordo com a dinâmica do movimento, para que um veículo saia da inércia, ou seja, modifique sua condição atual, é necessário que seja feita uma modificação na quantidade de movimento. Para isso uma força deverá atuar para a movimentação translacional e proporcionalmente para a movimentação rotacional visto que a movimentação linear está proporcionalmente ligada ao movimento angular dos eixos rotativos da transmissão.

Segundo Nicolazzi et al. (2012), a força necessária para sair da inércia  $Q_I$ , é o resultado da superposição dos efeitos de rotação  $Q_I''$  e translação no veículo  $Q_I'$  (Equação 20).

$$Q_I = Q_I' + Q_I'' \quad (20)$$

Para translação é aplicado a Segunda Lei de Newton. Logo a quantidade de movimento varia de acordo com a aceleração  $a$  imposta sobre o veículo de massa  $m$  (Equação 21).

$$Q_I' = ma \quad (21)$$

Para a rotação, Nicolazzi et al. (2012), afirma que devido a aceleração ser angular é necessário aplicar um momento em cada eixo rotativo. De modo geral, haverá um momento de inércia para o motor  $J_m$ , para a transmissão  $J_t$  e para as rodas  $J_r$ . Pela conservação da energia cinética obtém-se a Equação 22 que representa o momento total  $J$  e leva em conta a relação de transmissão do diferencial  $i_d$  e da relação de transmissão  $i_c$  atual.

$$J = J_r + i_d^2(J_t + i_c^2 J_m) \quad (22)$$

Pode-se escrever então, a quantidade de movimento rotacional conforme a Equação 23, em que  $r_d$  é o raio dinâmico da roda.

$$Q_I'' = \frac{Ja}{r_d^2} \quad (23)$$

Ao fazer a superposição das quantidades de movimento conforme a Equação 20, obtém-se a Equação 24

$$Q_I = ma\left(1 + \frac{J}{mr_d^2}\right) \quad (24)$$

Denominando  $\delta$  como inercia equivalente pode-se simplificar a Equação 20 para a Equação 25.

$$Q_I = ma(1 + \delta) \quad (25)$$

Por fim, Nicolazzi et al. (2012) afirma que para o anteprojeto de um veículo, uma boa aproximação do valor de  $\delta$  pode ser visto como a Equação 26.

$$\delta = 0,004 + 0,05i_c^2 \quad (26)$$

#### 2.4.4 Resistência ao Rolamento

A resistência ao rolamento  $Q_r$  é uma força opositora ao movimento devido ao contato entre pneu e pista. Ela depende da quantidade de pressão, do perfil usado e do tipo de fabricação do pneu (NICOLAZZI et al., 2012).

O valor de  $Q_r$  pode ser calculado experimentalmente ou empiricamente por meio da Equação 27 que utiliza a inclinação da pista  $\alpha$  e um coeficiente  $f$  de resistência de atrito de rolamento.

$$Q_r = fG \cos \alpha \quad (27)$$

Tabela 1 – Coeficientes de atrito de rolamento

<b>Tipo de piso</b>	<b>Valor de "f"</b>
Asfalto liso	0,010
Asfalto rugoso	0,011
Cimento rugoso	0,014
Paralelepípedo	0,020
Pedras irregulares	0,032
Pedra britada compacta	0,045
Pedra britada solta	0,080
Terra batida	0,060
Areia solta	0,100 a 0,300
Gramma	0,045 a 0,100
Barro	0,100 a 0,400
Neve profunda	0,075 a 0,300

Fonte: Nicolazzi et al. (2012).

A Tabela 1 apresenta alguns valores gerais para alguns tipos de terreno. O valor de  $f$  além de variar com a composição e formação da pista também varia de acordo com a pressão dos pneus, isso devido as variações obtidas na banda de rodagem quando um mesmo pneu está com pressão diferente do indicado (NICOLAZZI et al., 2012).

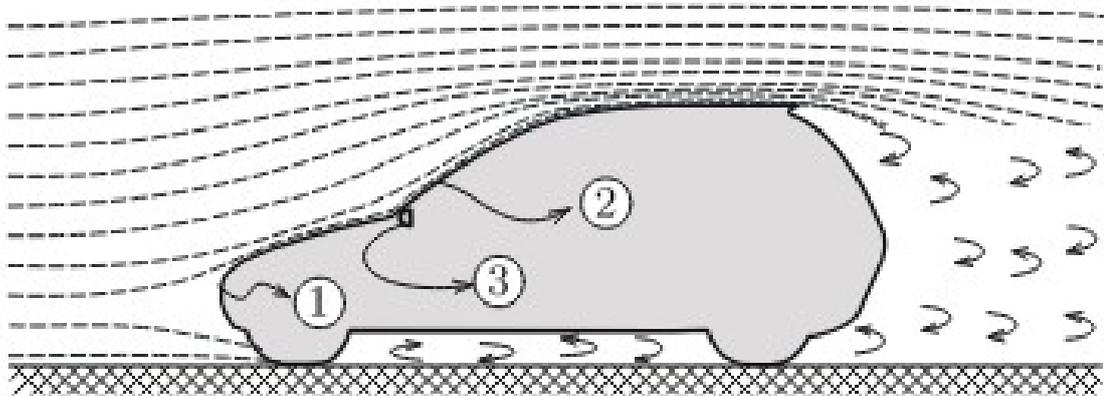
Para melhores resultados, deve-se obter o valor específico para o terreno ao qual o veículo está inserido por levantamento experimental.

### 2.4.5 Resistência Aerodinâmica

A resistência aerodinâmica é o resultado de três fatores: forma, atrito e correntes de ar. A resistência obtida pela forma/geometria ocorre com o desprendimento da camada limite do fluxo de ar da superfície, esse desprendimento gera turbulência que por sua vez é o causador da resistência para o movimento.

Por meio da Figura 10, pode se localizar a presença dos três fatores. A seta de número 1 corresponde as correntes de ar que adentram ao interior do veículo; a seta número 2 corresponde ao atrito que o fluido tem com a superfície e a seta de número 3 indica as perdas devido a geometria.

Figura 10 – Fatores aerodinâmicos.



Fonte: Nicolazzi et al. (2012).

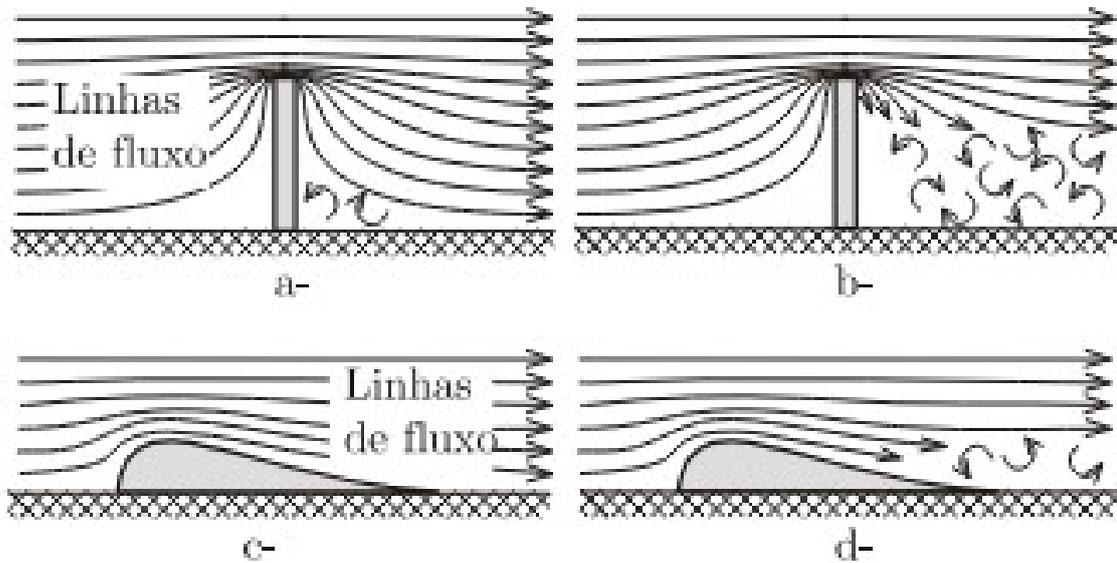
Para a resistência de forma, quanto maior a área de contato transversal (conforme visto na Figura 11) e o fluxo, maior será a turbulência e conseqüentemente maior será a força que se opõe ao movimento (NICOLAZZI et al., 2012).

Segundo (NICOLAZZI et al., 2012), o atrito vem do contato entre o fluxo de ar e a superfície. Em geral é baixo para os veículos devido a velocidade ser menor, compondo maior responsabilidade para veículos de alta velocidade/desempenho como aviões, trens e veículos de corrida. Já as correntes de ar geram resistência quando entram na superfície para resfriar motores, componentes mecânicos e até mesmo as cabines.

$$Q_a = qC_x A \quad (28)$$

A Equação 28 é a relação empírica entre os três fatores. Em que,  $q$  é a pressão dinâmica,  $C_x$  é o coeficiente de resistência aerodinâmica que deve ser um

Figura 11 – Perfil de resistência a forma.



Fonte: Nicolazzi et al. (2012).

valor experimental e  $A$  é a área projetada da seção transversal (NICOLAZZI et al., 2012).

$$q = \frac{1}{2}v^2\rho \quad (29)$$

Nota-se que a pressão dinâmica tem relação direta com a velocidade  $v$  e a densidade do meio  $\rho$  (conforme pode-se ver na Equação 29). Desse modo, quando em velocidades muito pequenas o valor de  $Q_a$  dependerá diretamente de  $A$ , o que indica que a resistência aerodinâmica será expressiva apenas para áreas grandes.

## 2.5 FORÇA MOTRIZ

Para analisar corretamente a capacidade de tração, aceleração e frenagem de um veículo é importante conhecer corretamente qual a contribuição de cada eixo na distribuição das cargas de um veículo. Uma aplicação simples da Segunda Lei de Newton em um diagrama de corpo livre, é capaz de nos informar a distribuição de cargas para um veículo sujeito ou não a uma situação de rampa (GILLESPIE, 1992).

A força motriz é a quantidade de força que deve ser aplicado no par pneu pista para que seja possível retirar o veículo da inércia do movimento. Do pressuposto que a velocidade é pequena, próxima de zero, pode-se desconsiderar as perdas aerodinâmicas e as perdas de inércia. Com isso obtém-se que a força motriz respeitará a Equação 30.

$$F_{m(v=0)} = Q_r + Q_s \quad (30)$$

A Figura 13 mostra o diagrama de corpo livre de um veículo fora do repouso. De acordo com a posição do CG, é correto definir a distribuição de forças para o eixo dianteiro ( $R'_I$ ) e para o eixo traseiro ( $R'_{II}$ ). Com a definição de um coeficiente de atrito ( $\mu$ ), pode-se calcular as forças motrizes  $F_{mI}$  e  $F_{mII}$  para os eixos dianteiro e traseiro respectivamente.

Figura 12 – Diagrama de forças no centro de massa com veículo em movimento.

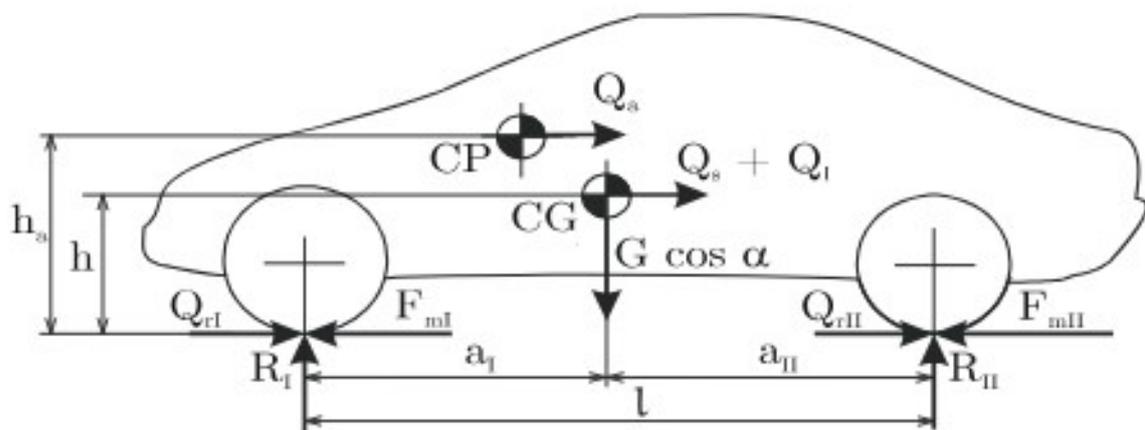


Figura 13 – \*

Fonte: Nicolazzi et al. (2012).

Ao considerar que as forças motrizes para tirar o veículo da inércia do movimento é maior quando o veículo está em baixas velocidades, pode-se calcular a força máxima motriz para as situações de tração integral, somente dianteira e somente traseira.

Para uma configuração de tração integral, os dois eixos irão transferir potência para o solo, dessa forma é correto considerar que o peso integral ( $G$ ) do veículo contribuirá para a transferência de potência de acordo com a Equação 31.

$$F_m^{max} = \mu G \cos \alpha \quad (31)$$

Em que:

$\alpha$  - ângulo da rampa.

Para as condições de transmissão dianteira e traseira, deve-se considerar a distribuição  $x$  da carga sobre cada eixo. Dessa forma, considera-se a Equação 32 e Equação 39 para determinar a força motriz máxima para o eixo dianteiro e traseiro respectivamente.

$$F_{mI}^{max} = \mu G \cos \alpha \left[ \frac{(1 - x + \frac{fh}{l})}{1 + \frac{\mu h}{l}} \right] \quad (32)$$

$$F_{mII}^{max} = \mu G \cos \alpha \left[ \frac{x + \frac{fh}{l}}{1 + \frac{\mu h}{l}} \right] \quad (33)$$

em que:

$x$  - Porcentagem do peso sobre eixo traseiro;

$h$  - Altura do CG;

$l$  - Distância entre eixos.

O valor de  $\mu$  é o coeficiente de atrito estático do pneu. Ele é responsável por fazer o pneu girar sem que haja escorregamento entre o contato pista pneu e tem seus valores generalizados para automóveis de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes de atrito estático

<b>Tipo de piso</b>	$\mu$
Asfalto	0,6 a 0,95
Pedra Britada	0,5 a 0,65
Terra seca	0,5 a 0,70
Terra umida	0,5 a 0,60
Areia	0,2 a 0,3
Neve	0,30 a 0,35

Fonte: Nicolazzi et al. (2012).

É necessário entender que para maior fidelidade entre o projeto e as condições de operação, os valores de  $f$  e  $\mu$  devem ser calculados experimentalmente de acordo com: modelo, dimensões, pressão e deformação dos pneus utilizados; e de acordo com o tipo e as condições do solo.

### 3 METODOLOGIA

A fim de validar o projeto mecânico de acordo com as especificações técnicas do conjunto de *powertrain* fornecidos pela WEG, seguiu-se a metodologia de desenvolvimento de projeto utilizado pela equipe CTJ Baja, PRODIP.

Como o objetivo do projeto do baja elétrico é ser um produto minimamente viável (da sigla inglesa MVP) a equipe utilizou de recursos e produtos já desenvolvidos para integrar o projeto, desta forma a metodologia foi adaptada para a realização de um protótipo e não para a produção de um produto serial.

#### 3.1 PROJETO PRODIP

O PRODIP é uma ferramenta ou método utilizado para gerir o desenvolvimento de um produto, englobando todas as fases que o projeto deve passar durante seu desenvolvimento.

Conforme pode ser visto na Figura 14 a estrutura do método é composta por três grandes etapas: planejamento; projeção e implementação, a metodologia engloba desde o processo embrionário da primeira etapa, o processo de crescimento e desenvolvimento durante a segunda etapa e pôr fim a maturação e validação do produto para o lançamento na terceira etapa.

Figura 14 – Estrutura simplificada PRODIP.



Fonte: Adaptado de Back et al. (2008).

A fase de planejamento divide-se em duas etapas menores: a primeira, planejamento do produto, tem como finalidade definir o escopo do produto e o tempo necessário para seu desenvolvimento, gerando como resultado o plano de desenvolvimento. A segunda fase, planejamento do projeto, serve para que a partir do plano de desenvolvimento seja definidas as estratégias de desenvolvimento, juntamente com o cronograma, orçamento, estrutura de produção e demais esquemas que englobem a complexidade do produto.

A segunda grande fase faz referência a projeção. Essa fase é onde o produto começa a ganhar forma e documentação técnica, e é subdividida em quatro subfases:

- Projeto informacional: é o momento em que são levantadas todas as informações necessárias para o desenvolvimento do projeto. Tem como objetivo organizar as informações do produto a fim de elaborar os requisitos do produto e o grau de relevância de cada requisito no projeto;
- Projeto conceitual: busca encontrar soluções a partir dos requisitos levantados pelas necessidades dos clientes, o escopo do produto e as limitações impostas seja por meio interno (desenvolvimento) ou por questões externas (legislações ou área de aplicação).
- Projeto preliminar: é o ponto onde o produto ganha corpo, é a parte do projeto onde se desenvolve a geometria, estipula-se as dimensões, define-se o material e o método de fabricação a ser utilizado.
- Projeto detalhado: por fim, é o momento em que o projeto do produto é finalizado, nessa etapa as fases anteriores são revisadas e o protótipo do produto passa por testes para certificar que atende as necessidades, se o formato geométrico atende as especificidades da solução e se desenvolve a documentação técnica necessária para a produção do produto.

Para a última fase do desenvolvimento do produto, tem-se a implementação. Busca-se preparar o produto para a produção serial por meio da preparação do processo de produção e montagem; a produção do lote piloto e lançamento para os usuários; a validação do produto junto aos clientes e a melhoria do sistema produtivo por meio de auditorias.

## 3.2 MVP E-BAJA

Para o projeto requisitado, com premissa vinda da SAE de ser um produto minimamente viável e que contaria com a parceria de demais interessados como a WEG, a equipe iniciou sua etapa de desenvolvimento de produto por meio do PRODIP e devido a não necessidade de tornar-se um produto comercial, seguiu-se apenas até a etapa de projeção.

### 3.2.1 Planejamento

Reuniões entre a equipe CTJ Baja com integrantes da SAE definiram o protótipo e-baja como um projeto de baixo custo com a intenção de utilizar o menor orçamento possível e alcançar a performance igual ou semelhante aos veículos baja a combustão visto que ambos compartilhariam as mesmas provas de validação e possivelmente disputariam entre si. De forma semelhante será utilizado o método PRODIP para analisar o projeto do protótipo e-baja.

### 3.2.2 Projeto informacional

De acordo com as premissas do projeto lançado pela SAE Brasil, a equipe resolveu reutilizar um protótipo ao qual recentemente havia competido e passado por todas as provas de inspeção técnica de segurança e seguir, portanto, os mesmos requisitos que originaram o trem de força daquele protótipo.

Na Tabela 1 elenca-se os requisitos adotados para o projeto e-baja. Busca-se a partir desses requisitos obter desempenho semelhante quando comparado o mesmo protótipo utilizando o trem de força a combustão e posteriormente elétrico.

Quadro 1 – Requisitos e-baja.

<b>Requisitos</b>	<b>Descrição</b>
Premissa 1 SAE	Produto minimamente viável
Premissa 2 SAE	Protótipo deverá transpor obstáculos semelhantes ao modelo atual de competição
Premissa 1 CTJ Baja	Robustez
Premissa 2 CTJ Baja	Baixo custo
Requisito 1 CTJ Baja	Ultrapassar obstáculos com inclinação de 100%
Requisito 2 CTJ Baja	Atingir 50km/h em terreno sem aclave
Requisito 3 CTJ Baja	Utilizar componentes comerciais para a transmissão
Requisito 4 CTJ Baja	Confiabilidade

Fonte: Autor(2024).

O conjunto de motor e inversor disponibilizado pela WEG, parceira do projeto, deveria ser de potência equivalente ao MCI utilizado nos protótipos a combustão para manter o equilíbrio e a competitividade em uma possível competição mista entre os dois tipos de tração.

Dessa forma ficou à disposição da equipe uma variação do motor de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo, variação do modelo WTE300-IND300, que pode ser visto na Figura 15 e tem como principais os principais dados apresentados na Tabela 3.

Figura 15 – Motor WEG WTE300-IND300.



Fonte: Autor (2024).

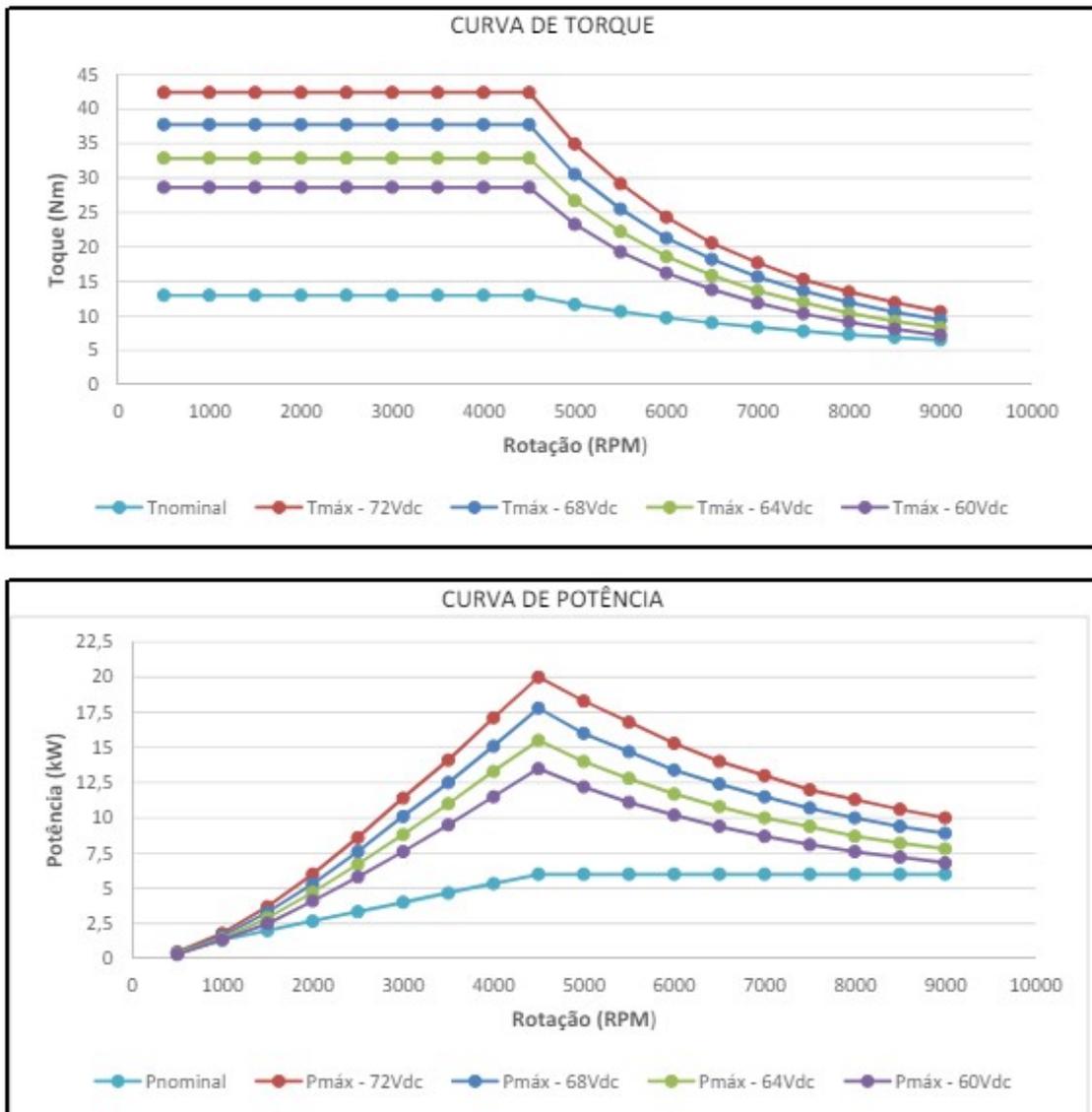
Tabela 3 – Principais características do Motor

Potência nominal	6 kW
Potência máx.	20 kW
Rotação nominal	4400 rpm
Rotação máx.	9000 rpm
Tensão nominal	51 Vca
Corrente nominal	118 A
Torque nominal	13 Nm
Torque máx.	42,4 Nm
Fator de serviço	1,00
Categoria	N
Proteção	IP55

Fonte: Anexo A.

Esse modelo de motor possui suas curvas de torque e velocidade conforme Figura 16 disponível no Anexo A.

Figura 16 – Curvas de Torque e Potência.



Fonte: Anexo A.

O inversor é o modelo CVW300A0400D0NB66 (Figura 17), item comercial que permite o controle de rotação e torque de motores de indução trifásicos voltados para o uso em tração elétrica.

Esse modelo de inversor permite que seja feito o controle escalar, vetorial *sensorless* e vetorial com *encoder* que permite realizar o controle de torque e velocidade até zero, além de permitir a programação em Ladder para customização de novas aplicações também possui uma sistema pré configurado de aplicações que podem ser programadas com o auxílio de uma interface homem-máquina WEG (2016).

A Tabela 4 mostra as principais características do inversor. Vale ressaltar que a corrente nominal é suportada por uma hora quando submetido a uma temperatura de 40°C e fixado em um dissipador de 0,13°C/W.

Figura 17 – WEG CVW300A0400D0NB66.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 4 – Principais características CVW300.

Tensão de entrada nominal	24-72 Vcc
Tensão de entrada limite	18-90 Vcc
Corrente nominal saída	200 A
Corrente de pico saída	400 A
Tensão de saída	$V_{cc}\sqrt{2}$

Fonte: WEG (2016)

Vale ressaltar que a corrente de pico pode variar de acordo com o dissipador utilizado para refrigeração, e que o valor informado é tolerado por até dois minutos quando não se faz uso de dissipador de calor e a temperatura ambiente é de 25°C.

Além das conexões elétricas o inversor dispõe de conexões de comunicação para rede CAN e RS485, entrada para sensores além de entradas e saídas programáveis conforme elencado a seguir:

- 8 Entradas digitais;
- 2 Entradas analógicas com tensão tolerada de  $\pm 10V$ ;
- 1 Entrada para sensor de temperatura do motor - PTC;
- 1 Entrada para encoder incremental;
- 1 Conexão para interface de operação - IHM;

- 1 Porta CAN;
- 1 Porta RS485;
- 4 Saídas digitais;
- 2 saídas analógicas com tensão 0 - 10V;
- 1 Saída digital relé.

O projeto e-baja utilizou o protótipo CTJ baja 01 (Figura 18) e, portanto, leva em consideração os seus parâmetros (conforme Tabela 5).

Figura 18 – CTJ Baja 01.



Fonte: CTJ Baja(2024).

Os parâmetros do veículo embutem, também, a massa e altura do piloto visto que são fatores que influenciam no CG do veículo. Para a massa é considerado que o veículo a combustão e o veículo elétrico possuem o mesmo peso para o conjunto *powertrain* não ocasionando mudanças no peso total (piloto e veículo) de um veículo para outro.

Tabela 5 – Parâmetros CTJ Baja 01.

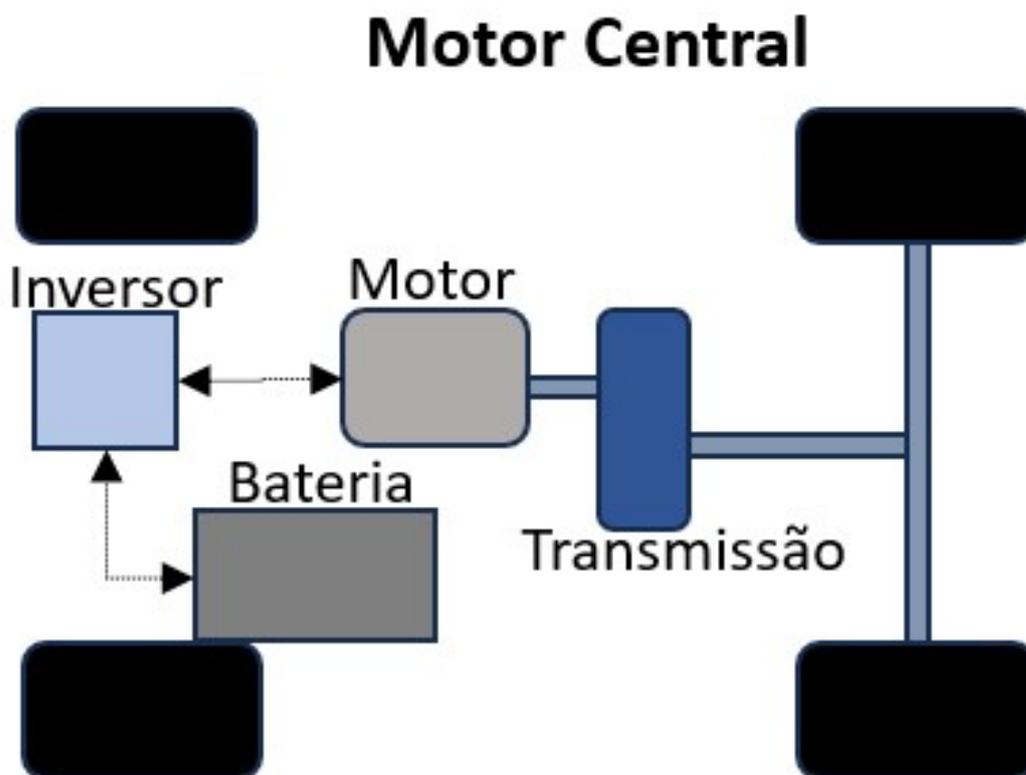
Massa	305 kg
Distância entre eixos	1390 mm
Altura do CG	612 mm
Massa eixo dianteiro	183 kg
Massa eixo traseiro	122 kg
Distância CG eixo traseiro	620 mm
Distância CG eixo dianteiro	770 mm
Medida pneus	21"x7-10"

Fonte: Autor (2024).

### 3.2.3 Projeto conceitual

A configuração de tração utilizado pela equipe para o desenvolvimento do protótipo e-baja segue o modelo com motor central (Figura 19), nesse modelo o motor é conectado a um sistema responsável por realizar a transmissão de potência para as rodas.

Figura 19 – Configuração com motor central.

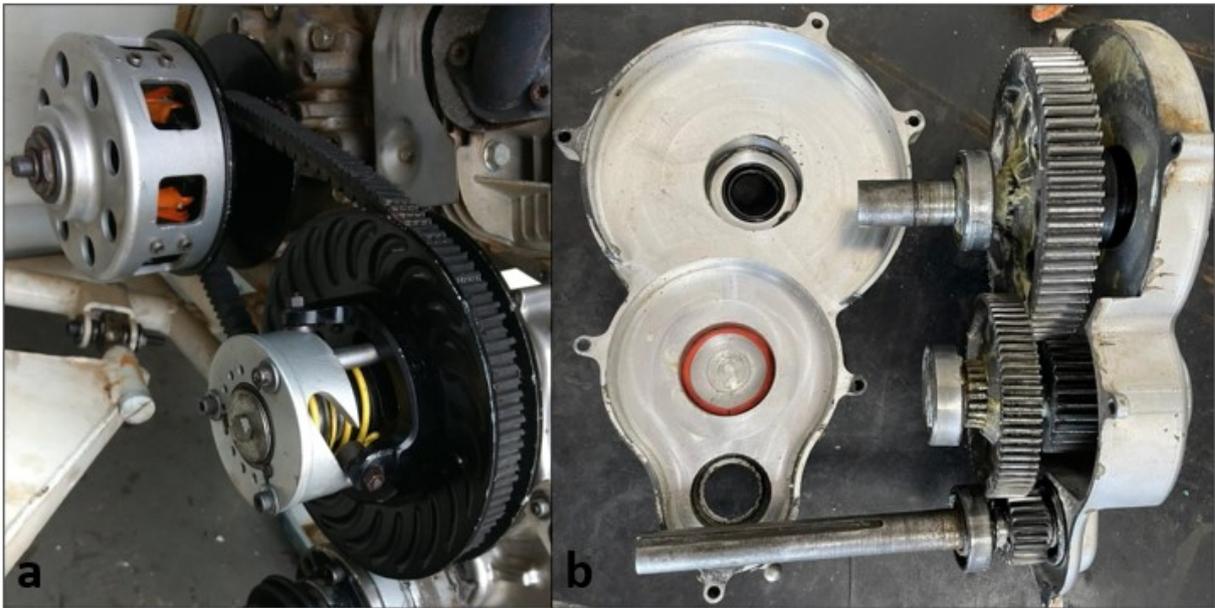


Fonte: Adaptado de NeoCharge (2022).

Para a transmissão da potência a equipe dispunha de uma transmissão do

tipo CVT com relação variável de 3,90:1 a 0,9:1 (Figura 20a) e uma caixa redutora com relação total de 7,86:1 (Figura 20b) que fazia parte do conjunto de transmissão do protótipo CTJ Baja 01.

Figura 20 – Conjunto de transmissão CTJ Baja 01.



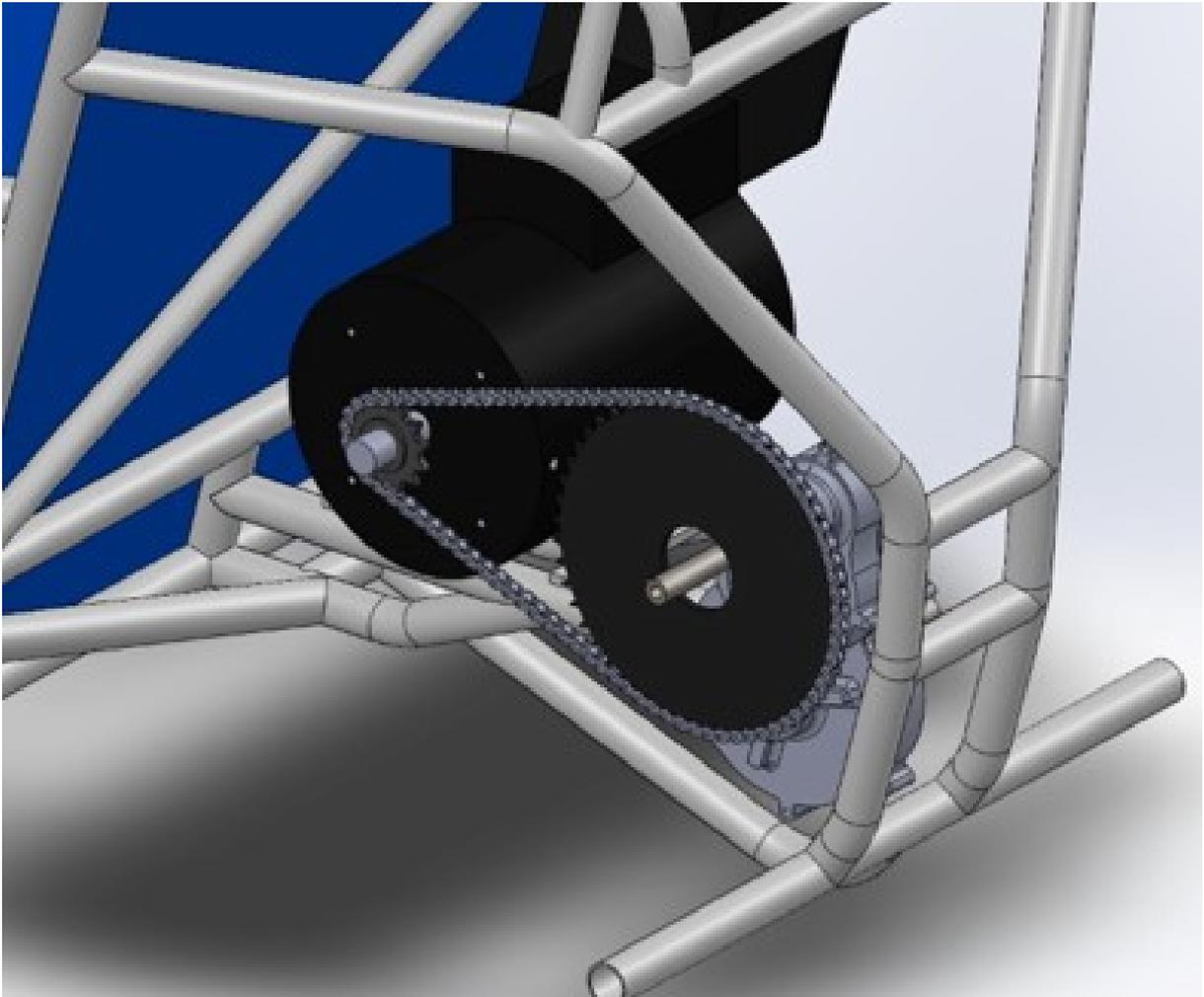
Fonte: CTJ Baja (2024).

O inversor de frequência é posicionado junto ao motor e será fixado atrás da parede corta fogo, o conjunto de baterias será disposto no assoalho do veículo em um invólucro de proteção contra explosões e o nível de aceleração se dará com o uso de uma entrada analógica do inversor e um potenciômetro atrelado ao pedal.

Devido ao motor elétrico acelerar de velocidade zero até a máxima, não se faz necessário o uso de nenhum tipo desacoplamento entre motor e transmissão e dessa forma, a equipe resolveu utilizar uma transmissão de relação fixa no local da transmissão CVT conforme pode ser visto na Figura 21.

O conjunto de transmissão adotado utiliza a caixa de redução e um par de coroas dentadas interligadas por corrente de uso comercial e com relação de 1,69:1. Dessa forma origina-se uma relação de transmissão total combinada de 13,28:1.

Figura 21 – Configuração de transmissão e-baja.



Fonte: CTJ Baja (2024).

### 3.2.4 Projeto preliminar

De acordo com os requisitos e as configurações de projeto adotados pode-se realizar o cálculo das forças. Para o cálculo da força necessária para transpor um obstáculo a 100% de inclinação (Requisito 1) o valor admitido será o teto da Equação 30, os parâmetros definidos na Tabela 5 e a aceleração gravitacional  $g = 9,81$ .

$$F_{m(v=0)} = 305 \cdot 9,81 \cdot \sin 45 + 305 \cdot 9,81 \cdot \cos 45 \cdot 0,06 = 2243N \quad (34)$$

A partir da força necessária para movimentar o protótipo, pode se verificar a relação mínima necessária de transmissão para que o veículo atinja o Requisito 1. Reescrevendo a Equação 18 de acordo com a Segunda Lei de Newton para rotação, a relação máxima será o resultado da Equação 35.

$$F_{m(v=0)} \cdot r_d = T_m \cdot i_c \cdot \eta_{mec} \Rightarrow i_c = \frac{2243 \cdot 0,26}{42,4 \cdot 0,93} = 14,8 \quad (35)$$

Logo, ao considerar uma eficiência mecânica de 93%, de acordo com a Equação 35, para que seja possível transpor um obstáculo com 100% de alicive o protótipo deve ter uma relação máxima de 14,8:1.

Para o Requisito 2 calcula-se a relação máxima necessária por meio da reorganização Equação 36, considera-se, também, toda a elasticidade do motor alcançando sua rotação máxima.

$$v = \frac{w \cdot r_d}{i_c} \Rightarrow i_c = \frac{\frac{9000}{9,55} \cdot 0,26}{\frac{50}{3,6}} = 17,64 \quad (36)$$

Como o projeto utiliza a caixa de redução do protótipo anterior, a relação de transmissão das coroas dentadas deve ser o valor total de relação dividido pela relação da caixa de redução conforme a Equação 38 para a maior relação e conforme a Equação 37 para a menor relação.

$$i_c^{min} = \frac{14,8}{7,86} = 1,88 \quad (37)$$

$$i_c^{max} = \frac{17,64}{7,86} = 2,24 \quad (38)$$

Para que não haja perda de aderência no momento em que a força de tração for transmitida para o solo é necessário calcular a força motriz máxima para o eixo traseiro  $F_{mII}^{max}$ .

$$F_{mII}^{max} = \mu G \cos \alpha \left[ \frac{x + \frac{fh}{l}}{1 + \frac{\mu h}{l}} \right] = 0,60 \cdot 305 \cdot 9,81 \cdot \cos 0 \cdot \left[ \frac{0,6 - \frac{0,08 \cdot 612}{1390}}{1 - \frac{0,60 \cdot 612}{1390}} \right] = 1377,91N \quad (39)$$

O torque limite para evitar a perda de aderência no contato entre pneu e pista deve ser então o piso da força trativa máxima  $F_{mII}^{max}$  multiplicado pelo raio dinâmico  $r_d$ .

$$T = F_{mII} \cdot r_d = 1377,91 \cdot 0,26 = 358Nm \quad (40)$$

Considerando o valor de  $\mu$  para terra seca de 0,60 e o coeficiente de atrito de rolamento( $f$ ) de 0,08 para situação de pedra britada solta.

Como a relação de transposição para o aclave é menor do que a relação velocidade, para que os dois requisitos sejam atendidos é correto selecionar a menor relação possível, nesse caso  $i_c^{min}$ . Dessa forma a velocidade máxima teórica será conforme a Equação 41.

$$v = \frac{9000 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0,26 \cdot 3,6}{60 \cdot 14,8} = 59,61 \text{ km/h} \quad (41)$$

Para a configuração adotada pela equipe, substitui-se a relação total  $i_c^{min}$  pela relação total de redução que o projeto tem atualmente obtêm-se os resultados na roda mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros CTJ Baja 01.

$F_m$	2014,58 N
$T$	523,66 Nm
$v$	66,43 km/h
$i_c$	13,28:1

Fonte: Autor (2024).

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÕES

De acordo com recursos disponíveis a equipe concluiu a construção do protótipo e-baja Figura 22. Como não foi possível recursos próprios para adquirir um pack de baterias ou empresa parceira com recursos para proporcionar um conjunto para testes, o protótipo requer uma fonte de energia.

Figura 22 – Protótipo CTJ e-baja .



Fonte: CTJ Baja (2024).

Visto que, uma simulação computacional do projeto não terá efetividade para comparação de resultados devido ao inversor CVW300 realizar o autoajuste dos parâmetros de acionamento, e que os parâmetros de controle não são externalizados, não se faz possível simular o conjunto avaliado com mesmos parâmetros de uso.

Os resultados discutidos serão fundamentados na teoria considerando valores de  $f$  e  $\mu$  generalizados conforme as Tabelas 1 e 2. Os parâmetros utilizados nos cálculos seguem os mesmos parâmetros utilizados para o projeto da caixa de redução em uso e desenvolvido por Esquitino (2023).

#### 4.0.1 Requisito 1: aclave 100%

A relação de transmissão do par de coroa dentada que atenda ao requisito de transpor aclives com 100% de inclinação, na utilização combinada conforme o modelo utilizado pela equipe, deve ser igual ou superior a 1,88:1, conforme visto na Equação 38. Com uma relação total de transmissão maior ou igual a 14,8:1.

Quando confrontado com o valor atual, de 13,28:1 de relação de redução, percebe-se que para o cumprimento do Requisito 1 a configuração adotada pela equipe não atende a necessidade mesmo que os cálculos são feitos para os valores máximos de desempenho do motor.

#### 4.0.2 Requisito 2: atingir 50 km/h

Considerando a velocidade máxima do motor, 9000 rpm, e as condições iniciais adotadas durante o projeto, para que o protótipo e-baja atinja a velocidade de 50 km/h se faz necessário uma transmissão com relação menor que 17,64.

Desse modo, tanto a relação já adotada pela equipe atende ao projeto quanto a redução calculada na Equação 31 para o Requisito 1. Nessa etapa é necessário julgar qual será a melhor escolha para a equipe.

#### 4.0.3 Consequências de projeto

A Figura 23 mostra o gráfico com a relação entre a velocidade e o torque de acordo com a variação da relação de redução entre o valor máximo e mínimo. Pode-se perceber que a relação entre velocidade e torque na roda são inversamente proporcionais e, portanto, a escolha deve levar em consideração as consequências ao operar em cada região.

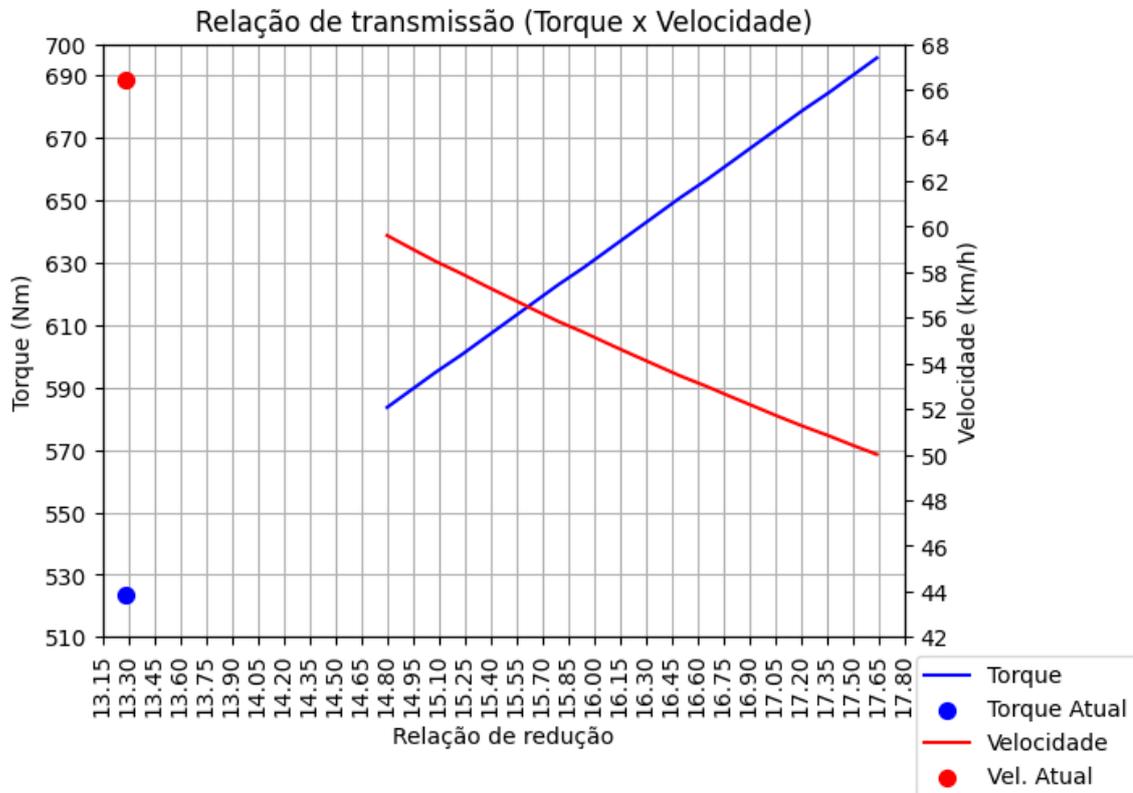
Pode-se observar que: o valor de relação utilizado no protótipo e-baja se encontra fora dos valores compreendidos pelo intervalo calculado (pontos fora das curvas), isso se dá devido ao valor atual da relação atender somente o requisito de velocidade, conforme observado na Tabela 6.

Entende-se como ideal, para o melhor desempenho do veículo, adotar valor de relação em que as curvas se interceptam, esse ponto de encontro é a melhor opção de relação para o maior desempenho em torque e em velocidade simultaneamente.

Para os valores à esquerda da interseção, tem-se a região de menor torque, ou seja, quanto menor é a relação de transmissão, menor o torque e em consequência, maior a velocidade.

Como a relação de torque e velocidade é inversamente proporcional para esse caso, para a região à direita da interseção encontra-se, portanto, os pontos de operação de maior torque e menor velocidade.

Figura 23 – Gráfico Torque x Velocidade .



Fonte: Autor (2024).

Para tal, o que pode ser observado é que um veículo com relação mais reduzida pode absorver as simplificações feitas ao utilizarmos coeficientes generalizados e que não retratam com fidelidade as condições da competição e ao tipo de pneu utilizado, por este modo recomenda-se a utilização de relações a direita do ponto de interseção.

Portanto, é importante a equipe observar que ao escolher uma relação maior poderá lidar com situações em que o atrito de rolamento é alterado, como por exemplo, um trecho de pista em que a condição muda de pedra britada solta (terreno adotado nos cálculos) para barro, elevando o valor generalizado de  $f$  em 25%.

Levando isso em consideração, pode-se perceber que a relação utilizada no momento, por ser abaixo do limite de convergência dos requisitos, pode não ultrapassar ou concluir algumas provas durante a competição. Com a configuração atualmente adotada, não somente a partida em rampa é prejudicada como qualquer variação no tipo do terreno poderá trazer dificuldades para o protótipo.

Como o sistema de transmissão não leva em consideração um sistema de compensação de trajetória nas curvas, um artifício utilizado para facilitar o contorno das curvas é a perda de aderência com o solo.

Para que essa prática seja possível, qualquer relação que for optada que for-

neça um torque na roda maior que o expressado pela Equação 40 irá fazer os pneus deslizarem.

O que deve ser visto no momento do dimensionamento é a tensão suportada pela corrente. Conforme mostrado na Figura 16 durante praticamente todo o regime nominal de rotação, o torque é máximo e praticamente instantâneo, por isso deve-se ter cuidado ao dimensionar a corrente para que ela suporte o torque de pico do motor de forma "instantânea".

Até o momento foram utilizadas apenas as informações de pico para os cálculos, o que deve ser levado em consideração é não somente o desempenho, mas a proposta do veículo elétrico de ser uma configuração mais eficiente no que se fala de consumo energético quando comparado ao veículo a combustão.

Utilizar o veículo em condições de pico e traçar todo seu desempenho pensando apenas nesse tipo de operação poderá causar a sobrecarga do inversor, visto que é permitido o uso ininterrupto da potência de pico por dois minutos.

Caso a potência de pico seja muito solicitada deverá ser desenvolvido um sistema de refrigeração com maior efetividade que o padrão, e sistemas de segurança paralelos para garantir a integridade do conjunto elétrico.

#### **4.0.4 Premissa 1 SAE e Premissa 2 CTJ Baja**

De acordo com a Premissa 1 da SAE o projeto deve se tornar um produto minimamente viável. Dessa forma, deve encontrar métodos e materiais de mercado para diminuir o custo de desenvolvimento e finalização do protótipo.

Porém, o custo-benefício atrelado as baterias, motivo que deu origem ao desenvolvimento do motor a combustão interna, ainda se faz presente e representa maior parte dos custos de um VE.

Para que fosse capaz ser competitivo e durar 4 horas de prova simultânea com o modelo baja a combustão, seria necessário a utilização de um banco grande de baterias ou bancos menores para realizar a troca durante a competição.

Devido aos custos para a aquisição de um banco de baterias, a falta de recursos próprios e de parceiros comerciais a aquisição da bateria não foi possível. Dessa forma, com o custo em baterias estimado em torno de 70% do custo de produção de um veículo baja, a Premissa 1 deve ser reavaliada levando em consideração possíveis mudanças nas provas ou a criação de uma categoria separada que avalie o desempenho e a eficiência dos veículos e-baja.

Ao analisar a conversão do veículo combustão em um veículo e-baja nos modelos adotados pela equipe CTJ baja, o protótipo atual se mostrou uma solução de baixo custo, de simples fabricação e robusta. Um ponto a ser avaliado é a possibilidade de utilizar um único modelo de transmissão.

A utilização de uma transmissão mecânica de engrenagens se mostra robusta, mas devido aos métodos construtivos e aos materiais necessários para seu desenvolvimento o tornam um item de custo elevado quando comparado a um conjunto de coroas dentadas e corrente.

Devido ao alto torque de partida e a disponibilidade quase instantânea, para situações em acive de 100% deve ser avaliado a resistência da corrente para que o sistema seja robusto e suporte todas as exigências da competição.

#### **4.0.5 Conjunto motor inversor**

Conforme demonstrado até o momento, o motor fornecido tem condições de atender as exigências que a aplicação exige. Uma situação que deve ser considerada é a classificação IP55 e a condição de prova ao qual o e-baja será submetido.

A depender do obstáculo, pode-se fazer necessário a construção de um habitáculo que permita a transposição de locais com água garantindo a segurança durante a operação do motor. Caso seja necessário, deve se avaliar algum método de resfriamento para o motor devido ao grau elevado de isolamento que o habitáculo deve fornecer.

O inversor permite dois métodos de controle: velocidade e torque. Visando a facilidade de aplicação, o controle de velocidade se torna a melhor opção por ser um método em que o inversor se autoajusta de acordo com os parâmetros do motor. Porém esse método não tem boas respostas quando necessário operar em baixas velocidades.

O método de controle por torque permite o controle preciso desde a velocidade zero até a máxima disponível. Esse modelo tem maior complexidade de aplicação devido aos demais parâmetros de ajuste e para que opere a pleno, necessita que o motor possua um sensor *encoder*. Mais informações em WEG (2016)

De toda forma, o que deve ser analisado no momento de parametrizar o inversor é a inclinação da rampa de aceleração ou a limitação do torque até certas velocidades para garantir que o torque transmitido para o solo não seja excessivo ao ponto de ultrapassar o torque trativo limitado pela Equação 40.

#### **4.0.6 Considerações gerais**

Devido à disposição de um veículo pronto, das intenções da SAE de realizar uma categoria elétrica competitiva com a categoria atual, se fez uso do regulamento, das provas e das limitações que são impostas para os protótipos a combustão.

Dessa forma, quando trocado qualquer elemento ou parâmetro descrito anteriormente o projeto será alterado. Por esse motivo, deve-se avaliar as questões de volume e peso das baterias, como será feito o gerenciamento de potência elétrica,

ou seja, se será utilizado apenas uma bateria ou se será possível a troca do pack de baterias durante as provas e por fim o peso e altura do piloto.

Vale ressaltar que quanto maior a capacidade das baterias maior será o volume ocupado e, portanto, pode ser necessário alterar e até mesmo sair das dimensões limites exigidos pelo regulamento da competição. Além disso, a alteração do peso do piloto ou do volume e peso das baterias afeta diretamente a distribuição de cargas no veículo de modo a alterar dinâmica veicular anteriormente calculada.

Outras possibilidades podem ser avaliadas com relação ao modelo utilizado de tração utilizado. Eventualmente pode ser interessante explorar outros conceitos e avaliar o desempenho de um veículo fora de estrada com tração integral, seja por meio de um motor para cada eixo ou para o controle de cada roda com motores dedicados por roda.

Entretanto, as configurações e modificações não levam em conta as condições extremas possíveis de encontrar nas provas do Baja SAE. Isso faz com que se deve avaliar as condições e adaptar provas e tipos de pista para que seja possível garantir a segurança dos participantes.

Por se tratar de uma tecnologia nova para os protótipos nesse molde de competição, faz-se necessário uma primeira avaliação das condições em que um e-baja estaria submetido. Posteriormente, deve se iniciar um esboço para o regulamento de modo a integrar as limitações de segurança dos veículos elétricos.

## 5 CONCLUSÃO

Apesar da impossibilidade de obter resultados experimentais, com base na fundamentação teórica, discussões levantadas e nos resultados apresentados nesse trabalho, pode-se concluir que o conjunto *powertrain* WEG é capaz de atender as necessidades levantadas nas premissas e requisitos levantados pela SAE e pela equipe.

Apesar do modelo de transmissão de potência optado e projetado pela equipe CTJ baja atender parte dos requisitos e premissas, o Requisito 1 não pode ser atendido com a relação de transmissão utilizada atualmente. Todavia foi concluído que é possível encontrar uma relação de transmissão que atenda aos requisitos levantados com margem para compensar as simplificações e generalizações apresentadas nos cálculos.

Como forma de atender o objetivo geral do trabalho e os objetivos específicos, foi utilizada uma adaptação da metodologia de desenvolvimento de produto PRODIP. Com ela seguimos de forma análoga ao desenvolvimento do projeto para que fosse possível descrever a problemática do projeto, elencar as premissas e requisitos, apresentar o conceito utilizado para o desenvolvimento do protótipo e-baja e avaliar teoricamente os resultados construtivos que integram todo o sistema de *powertrain*.

Os resultados levantados e fundamentados nos requisitos trouxeram discussões relevantes para o desenvolvimento de pensamentos críticos, por meio da avaliação das condições atuais e de contorno, e para o desenvolvimento de novos projetos que poderão levar como base a fundamentação aqui apresentada e o modelo de avaliação seguido.

Com os resultados discutidos nesse trabalho, também é possível verificar a importância de um procedimento de validação de projeto ou produto durante a fase de pré-lançamento dos protótipos estudantis. A fim de garantir o funcionamento correto, a segurança e a satisfação com os resultados após finalizado também fomenta a autocrítica e o crescimento técnico das equipes de competição.

Por fim, no contexto da elaboração de mais conteúdo técnico dentro dos projetos e equipes de competição, recomenda-se para próximos trabalhos: a validação experimental dos resultados nesse trabalho apresentados e a verificação da influência das generalizações dos parâmetros utilizados, como coeficiente de atrito estático e coeficiente de atrito de rolamento.

## REFERÊNCIAS

- ANFAVEA. **Estudo BCG – O Caminho da Descarbonização do Setor Automotivo**. 2021. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/destaque1/>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. da. **Projeto integrado de produtos: panejamento, concepção e modelagem**. 1. ed. Barueri: Manole, 2008.
- CTJ BAJA, U. **CTJ baja UFSC | linkedin**. 2018. Disponível em: <https://www.linkedin.com/company/ctj-baja-ufsc>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- BOTTURA, C. P.; BARRETO, G. **Veículos elétricos**. 1. ed. Campinas: UNICAMP, 1989.
- COSTA, W. D. **Metodologia para conversão de veículos equipados com motores a combustão interna para tração elétrica: aplicação do motor síncrono de ímã permanente com fluxo magnético radial a um furgão**. 2009. Dissertação de mestrado (Pós-graduação em engenharia mecânica) — Centro de Tecnologia e Ciências: Faculdade de Engenharia. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009.
- ESQUITINO, R. M. **Projeto e Fabricação de Caixa De Redução para um Veículo BAJA SAE**. Joinville, SC: [s.n.], 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia), Universidade Federal de Santa Catarina.
- FITZGERALD, A. E.; JR charles kingsley; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. Tradução tradução Anatólio Laschuk.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. 1. ed. [S.l.]: SAE International, 1992.
- HUSAIN, I. **Electric and Hybrid Vehicles: Desing Fundamentals**. 1. ed. Boca Raton, Florida: SRC PRESS, 2003.
- MATULKA, R. The history of the electric car. **Energy.gov**, set 2014. Disponível em: <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>. Acesso em: 11 jul. 2022.
- MOHAN, N. **Máquinas elétricas e Acionamentos - Curso Introdutório**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. Tradução Walter Denis Cruz Sanches, Angelo José Junqueira Rezek.
- NEOCHARGE. **Motor Carro Elétrico - Veículo Elétrico (VE): NeoCharge**. 2022. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/motor-como-funciona#:~:text=%E2%80%8B%E2%80%8BCONFIGURAÃ&ã%20DO%20MOTOR%20NO%20CARRO%20ELÃLTRICO&ã;text=Uma%20opÃ&ã%20Ãl%20utilizar%20um,configuraÃ&ã%20de%20um%20motor%20Ãnico>. Acesso em: 24 jul. 2022.
- NICOLAZZI, L. C.; ROSA, E. da; COSTA MACHADO LEAL, L. da. **Uma introdução à modelagem quase-estática de automóveis**. Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC: Publicação interna do GRANTE, 2012.

PAOLI, L.; GÜL, T. Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales – analysis. **IEA**, jan 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales>. Acesso em: 13 jul. 2022.

WEG SA. **Inversor de Frequência para tração elétrica CVW300**: Manual do usuário. Jaraguá, 2016. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h72/h09/WEG-CVW300-G2-manual-do-usuario-10005423031-pt.pdf.pdf>.

## ANEXO A – FOLHA DE DADOS MOTOR



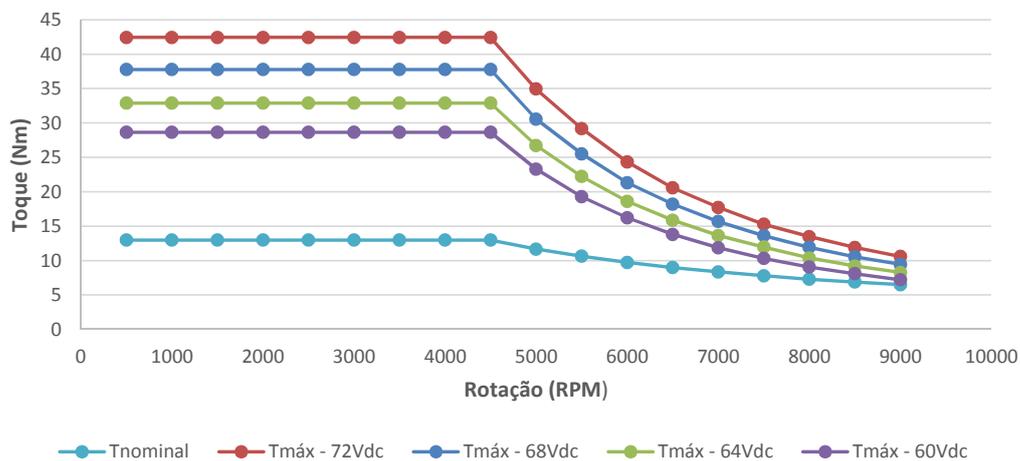
### WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A.

MOTOR ELÉTRICO PARA TRACÇÃO VEÍCULAR

#### ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

Carcaça	: 112	Regime de serviço	: -
Potência nominal	: 6 kW	Fator de serviço	: 1,00
Potência máxima	: 20 kW	Categoria	: N
Rotação nominal	: 4400 rpm	Grau de proteção	: IP55
Rotação máxima	: 9000 rpm	Torque nominal	: 13 Nm
Tensão nominal	: 51 Vca	Torque máximo	: 42,4 Nm
Corrente nominal	: 118 A	Resfriamento	: AR
Ip/In	: -	Massa	: 17 kg

#### CURVA DE TORQUE



#### CURVA DE POTÊNCIA

