

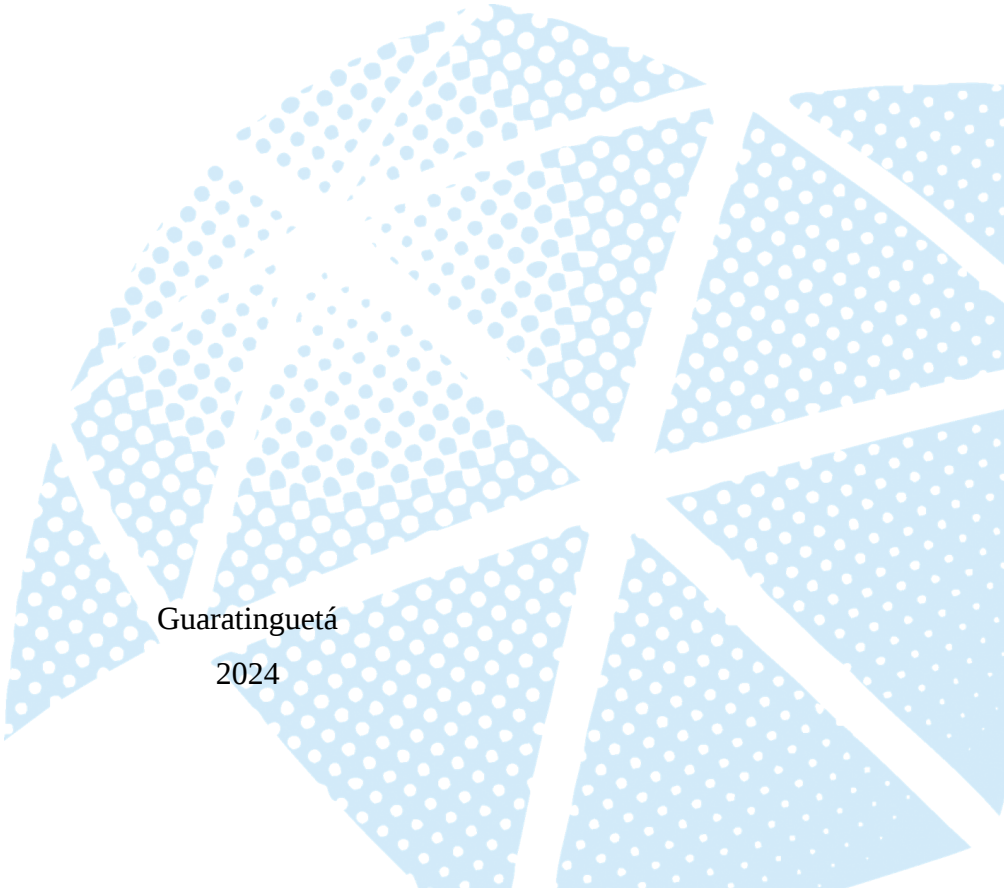
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

JONAS CADORINI NETO

**CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO E DE
BATERIAS DE UM VEÍCULO ELÉTRICO URBANO**

Guaratinguetá

2024



JONAS CADORINI NETO

**CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO E DE
BATERIAS DE UM VEÍCULO ELÉTRICO URBANO**

Trabalho de Graduação apresentado à
Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Engenharia e Ciências,
Guaratinguetá, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Augusto
Marcondes dos Santos

Guaratinguetá

2024

C125c	Cadorini Neto, Jonas Concepção e dimensionamento dos sistemas de propulsão e de baterias de um veículo elétrico urbano / Jonas Cadorini Neto. - Guaratinguetá, 2024. 76 f : il. Bibliografia: f. 72-76 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza Coorientador: Prof. Dr. Carlos Augusto Marcondes dos Santos 1. Automóveis elétricos. 2. Baterias elétricas. 3. Automóveis - Dinâmica. I. Título. CDU 621.352
-------	---

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

JONAS CADORINI NETO

**CONCEPÇÃO E DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS DE PROPULSÃO E DE
BATERIAS DE UM VEÍCULO ELÉTRICO URBANO**

Trabalho de Graduação apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Mecânica

Data da defesa: 14/11/2024

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **TEOFILO MIGUEL DE SOUZA**
Data: 28/11/2024 16:07:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

Documento assinado digitalmente
 **CARLOS AUGUSTO MARCONDES DOS SANTOS**
Data: 28/11/2024 15:00:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Augusto Marcondes dos Santos
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

Documento assinado digitalmente
 **RAPHAELA CARVALHO MACHADO**
Data: 09/12/2024 09:23:12-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Raphaela Carvalho Machado
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

Documento assinado digitalmente
 **THAIS SANTOS CASTRO**
Data: 29/11/2024 07:51:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Thais Santos Castro
UNESP - Faculdade de Engenharia e Ciências - Campus de Guaratinguetá

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, aos meus pais por todo o apoio ao longo da graduação, permitindo que eu me dedicasse com muito vigor para as atividades acadêmicas.

Além disso, agradeço aos alunos e professores do Centro de Energia Renováveis da FEG, por todas as oportunidades de pesquisa e de iniciação na carreira científica, e à SODEBRAS, por indicar meios de divulgação e de aprendizado de ciências.

Também ofereço meus sinceros agradecimentos a todos os amigos com os quais dividi ótimos momentos, alguns difíceis, muitos felizes, e que tornaram a graduação mais agradável e edificante.

E agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão das bolsas de pesquisa de iniciação científica, conforme as propostas 3846, do edital 4/2021, e 6647, do edital 4/2022. A realização deste trabalho é resultado das pesquisas desenvolvidas nos anos anteriores com o auxílio da CNPq.

“But ‘Thou mayest’! Why, that makes a man great, that gives him stature with the gods, for in his weakness and his filth... He has still the great choice.”

East of Eden, John Steinbeck

RESUMO

Os mercados automotivos apresentam tendências globais de eletrificação. Paralelamente, com o crescimento das cidades, há busca por carros compactos que melhor se adaptam ao trânsito e contêm maior taxa de ocupação. Este trabalho propõe, assim, dimensionar os sistemas de propulsão e de baterias de um carro elétrico compacto, os quais são importantes para o desenvolvimento do veículo. Para tanto, foi utilizado um modelo CAD de carro compacto dos quais foram extraídas as dimensões e as projeções de massa total, que também resultaram das especificações preliminares de motor e de baterias. A partir dos parâmetros iniciais, diversos cálculos analíticos foram realizados para demonstrar as forças envolvidas no deslocamento do automóvel e, assim, deu-se origem às demandas de potência e de torque. As potências necessárias foram organizadas por velocidade e por acentuação da pista de rolamento e algumas foram selecionadas para compor a faixa de funcionamento do veículo. Subsequentemente, foram observados diversos catálogos de fabricantes para comparar as opções de motorização e de baterias e os modelos que melhor atendiam, conforme as necessidades descritas, às demandas, foram especificados para o projeto. Além disso, alguns parâmetros de desempenho e consumo foram calculados para avaliar o rendimento do veículo. Logo, obteve-se as especificações e notou-se que as baterias de lítio oferecem maior autonomia pela massa reduzida. Ademais, para o caso urbano, motores com potência na ordem de 22 kW atendem às demandas convencionais de potência.

Palavras-chave: carros elétricos; dinâmica dos automóveis; baterias elétricas; transmissão.

ABSTRACT

Automotive markets are experiencing global trends in electrification. At the same time, with urban growth, there is a raising demand for compact cars, that are better suited to heavy traffic. This study, therefore, aims to size both propulsion and battery systems of a compact electric car. A CAD model of a compact car was used to obtain dimensions and total mass projections, which were also derived from preliminary specifications of the motor and batteries. Based on the initial parameters, various analytical calculations were performed to demonstrate the forces involved in the vehicle's movement, thus establishing power and torque demands. The required power was organized according to speed and slope of the driving surface, and some were selected to define the vehicle's operating range. Subsequently, various manufacturer catalogs were reviewed to compare motor and battery options, and the models that best met the specified requirements were selected for the project. Additionally, some performance and consumption parameters were calculated to assess the vehicle's efficiency. As a result, the specifications indicated that lithium batteries offer greater range due to their reduced mass. Furthermore, for urban applications, motors with a power rating of around 22 kW meet conventional power demands.

Keywords: electric cars; automobile dynamics; electric batteries; transmission.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de comercialização de veículos elétricos.....	14
Figura 2 - Gráfico de comercialização nacional de veículos elétricos	14
Figura 3 - Mercado de elétricos no Brasil	15
Figura 4 - Identificação dos objetivos da ONU	18
Figura 5 - Gráfico da bibliometria de “ <i>Battery electric vehicle</i> ”	22
Figura 6 - Publicações por país sobre o tema “ <i>Battery electric vehicle</i> ”	22
Figura 7 - Gráfico da bibliometria de “ <i>Urban small electric car</i> ”	23
Figura 8 - Publicações por país sobre o tema “ <i>Urban small electric vehicle</i> ”	24
Figura 9 - Gráfico da bibliometria de “ <i>Electric motor powertrain</i> ”	24
Figura 10 - Publicações por país sobre o tema “ <i>Electric motor powertrain</i> ”	25
Figura 11 - Mapa mental dos tipos de veículos elétricos	27
Figura 12 - Esquema simplificado de um motor elétrico	28
Figura 13 - Esquema simplificado de um motor elétrico	29
Figura 14 - Mapa mental com os principais tipos de motores elétricos	30
Figura 15 - Campos girantes do motor de indução.....	31
Figura 16 - Gráfico da corrente no enrolamento trifásico	31
Figura 17 - Mapa mental dos tipos de baterias.....	33
Figura 18 - Diagrama de blocos do carro elétrico	37
Figura 19 - Carro elétrico Kandi EV 5010	38
Figura 20 - Projeto da carroceria do carro elétrico	39
Figura 21 - Área frontal do carro.....	39
Figura 22 - Distribuição de massa de um veículo comum	40
Figura 23 - Vista isométrica do chassi veicular.....	42
Figura 24 - Diagrama de forças do carro.....	46
Figura 25 - Associação de baterias e inversor	49
Figura 26 - Desenho esquemático da transmissão.....	51
Figura 27 - Diagrama de corpo livre do projeto	53
Figura 28 - Gráfico da força pela velocidade com inclinação de 5°	56
Figura 29 - Gráfico da força pela inclinação com velocidade de 50 km/h.....	57
Figura 30 - Gráfico da potência pela velocidade em cada inclinação	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de massa de carros compactos	34
Tabela 2 - Capacidade dos veículos para aclives	36
Tabela 3 - Dimensões da carroceria	40
Tabela 4 – Massa do <i>body-in-white</i>	41
Tabela 5 - Características do pneu.....	43
Tabela 6 - Coeficientes de atrito de rolamento.....	44
Tabela 7 - Aclives.....	45
Tabela 8 - Massa dos componentes	54
Tabela 9 - Determinação da aceleração	54
Tabela 10 - Forças de condução em via horizontal	54
Tabela 11 - Forças de condução em aclive de 5°	55
Tabela 12 - Forças de condução em aclive de 10°	55
Tabela 13 - Forças de condução em aclive de 15°	55
Tabela 14 - Forças de condução em aclive de 20°	55
Tabela 15 - Torque em função da velocidade e da inclinação.....	57
Tabela 16 - Potência em função da velocidade e da inclinação	58
Tabela 17 - Potência convertida para cavalo-vapor.....	58
Tabela 18 - Solicitação mínima de potência.....	59
Tabela 19 - Corrente do banco de baterias	60
Tabela 20 - Área do fio de conexão.....	60
Tabela 21 - Diâmetro do fio [mm].....	61
Tabela 22 - Opções de baterias.....	61
Tabela 23 - Estimativa de autonomia para 18 kWh de bateria.....	62
Tabela 24 - Avaliação do consumo de energia elétrica	62
Tabela 25 - Relação de velocidade linear e rotações.....	63
Tabela 26 - Redução de rotações segundo polaridade do motor	63
Tabela 27 - Redução de velocidades da transmissão.....	64
Tabela 28 - Relação entre frequência do inversor e velocidade	64
Tabela 29 - Comparativo de motores elétricos do mercado	65
Tabela 30 - Disponibilidade de potência dos motores.....	65
Tabela 31 - Comparativo de inversores para tração	66
Tabela 32 - Massa do veículo com bateria de lítio	67
Tabela 33 - Potência mínima com bateria de lítio	67

Tabela 34 - Avaliação do consumo para bateria de lítio.....	67
Tabela 35 - Disponibilidade de potência no caso do lítio.....	68
Tabela 36 - Especificações para uso intermunicipal	68
Tabela 37 - Especificações para uso intramunicipal	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	PERSPECTIVAS ATUAIS DA ELETRIFICAÇÃO AUTOMOTIVA.....	13
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2	JUSTIFICATIVA	17
2.1	MOTIVAÇÕES EM CONCORDÂNCIA A PROGRAMAS	17
2.1.1	Motivações face aos ODS	18
2.1.2	Motivações face ao programa Mover.....	19
3	OBJETIVOS	20
3.1	OBJETIVO GERAL	20
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
4.1	MÉTODO DE PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	21
4.2	BIBLIOMETRIA.....	21
4.3	HISTÓRIA E PANORAMA ATUAL DOS CARROS ELÉTRICOS	25
4.3.1	Surgimento e desenvolvimento dos modelos elétricos	25
4.3.2	Tipos de carros elétricos.....	26
4.4	MOTORES ELÉTRICOS.....	27
4.4.1	Equacionamento do motor.....	31
4.5	BATERIAS.....	32
4.6	MOBILIDADE URBANA	33
4.7	TRAJETOS URBANOS.....	34
4.7.1	Inclinação das vias.....	35
5	MATERIAIS E MÉTODOS	37
5.1	MODELO DO CARRO URBANO.....	38
5.1.1	Exemplo base de carro elétrico.....	38
5.1.2	Design da carroceria.....	38
5.1.3	Design do chassi metálico.....	41
5.2	EQUACIONAMENTO DINÂMICO DO CARRO	42
5.2.1	Pneus.....	43
5.2.2	Carroceria	44
5.2.3	Determinação dos aclives	45

5.2.4	Dinâmica veicular	45
5.2.4.1	Forças dinâmicas na pista	46
5.2.4.1.1	<i>Arrasto aerodinâmico</i>	<i>46</i>
5.2.4.1.2	<i>Resistência ao rolamento.....</i>	<i>47</i>
5.2.4.1.3	<i>Força de aclave</i>	<i>47</i>
5.2.4.1.4	<i>Força de aceleração.....</i>	<i>47</i>
5.2.4.1.5	<i>Força trativa.....</i>	<i>48</i>
5.2.4.2	Torque.....	48
5.2.4.3	Potência	48
5.3	BATERIAS.....	49
5.4	MOTOR E TRANSMISSÃO	51
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
6.1	CÁLCULOS DE DINÂMICA VEICULAR	53
6.2	CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO DAS BATERIAS.....	59
6.3	CÁLCULOS DE MOTOR E TRANSMISSÃO.....	62
6.4	CASO DA BATERIA DE LÍTIO-FERRO-FOSFATO	66
6.5	ESPECIFICAÇÕES E CENÁRIOS	68
7	CONCLUSÕES.....	70
7.1	TRABALHOS FUTUROS	71
	REFERÊNCIAS.....	72
	BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	76

1 INTRODUÇÃO

Ao avanço ininterrupto da técnica moderna urge uma ética balanceadora. Nesse sentido, Jonas (2006), ao teorizar o princípio da responsabilidade, reiterou a necessidade da sustentabilidade em prol da preservação da humanidade. No entanto, a industrialização que conduziu à modernidade apresentou modos de produção e de consumo nocivos ao equilíbrio do meio ambiente.

Dessa forma, os estudos dos impactos antropogênicos na natureza, apesar de relativamente recentes na história – sendo a Conferência de Estocolmo de 1972 o início das reuniões internacionais, indicam que as consequências são vastas e inegáveis. No começo do século XXI, artigos já ratificavam as mudanças climáticas: Walther *et al* (2002) afirmou que a temperatura média da Terra aumentou, de forma irregular, 0,6 °C em 100 anos (1902 a 2002), com períodos de aquecimento mais severo a partir de 1976.

À semelhança de Walther *et al*, Richardson *et al* (2023) reafirmou a insustentabilidade global das ações humanas recentes. Segundo a autora, há estimativa de aumento de 1,35 °C na temperatura média até 2100, mantendo a concentração atual de 417 ppm de CO₂ na atmosfera. Por conseguinte, há carência de iniciativas a fim garantir a manutenção e o desenvolvimento harmonioso da sociedade com os ecossistemas nos quais vive.

No que tange ao setor de transportes, vital para a estruturação das sociedades modernas, tal problemática se repete. Segundo o relatório síntese de 2024, com base no ano de 2023, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética (ETE), o setor de transportes foi responsável por 33% do total de energia consumida no Brasil (ETE, 2024). Além disso, 77,5% da energia foi produzida por combustíveis não renováveis, como óleo diesel e gasolina. Nota-se, então, a profundidade dos impactos causados por esse setor no ambiente, dada sua escala e suas principais fontes de energia, emissoras consolidadas de GEEs.

Logo, dentre as soluções recentemente propostas para o setor de transportes face às urgências socioambientais, os veículos elétricos têm formado uma resposta eficaz. Arengues *et al* (2022) afirmou, por revisão bibliográfica, que as reduções de emissões na operação de carros elétricos variam entre 17% e 34%, valores que podem ser substancialmente elevados caso a fonte de energia para o veículo seja limpa.

Ao aproveitar os recursos naturais abundantemente dispersos no país, nesse caso, a matriz elétrica brasileira apresenta-se formidável para os carros elétricos, visto ser renovável e de baixo-carbono. Tavares (2023) indicou que 78,1% da matriz elétrica brasileira é renovável, a qual origina-se por diversas fontes, como hidráulica, eólica, biomassa e solar, em ordem

decrecente de representatividade. Diante dessa magnitude, a autora, ao lembrar o privilégio da matriz nacional, enfatizou a tendência de diversificação das fontes, o que permite atender, de forma segura e menos agressiva à natureza, às crescentes demandas energéticas.

Ao confrontar-se com a facticidade supracitada, este trabalho objetiva conceber e dimensionar os sistemas de tração e de baterias de um carro elétrico compacto. Dessa forma, é possível avançar significativamente no projeto do automóvel, que tem o intuito de ser adaptado às zonas urbanas e às necessidades diárias de seus habitantes.

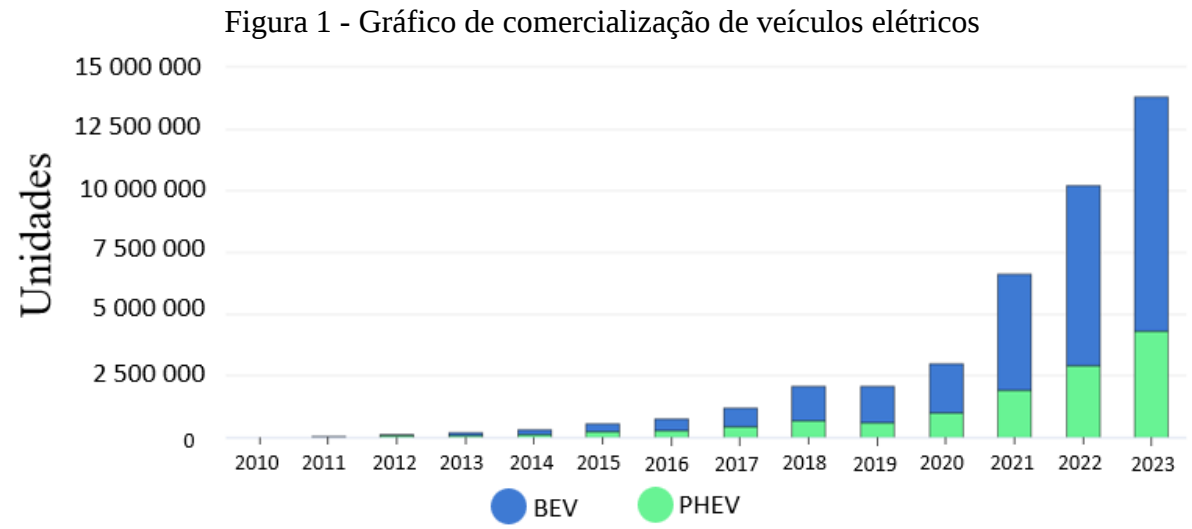
Calculando o tamanho do motor e das baterias, ambos disponíveis no mercado, almejou-se à elaboração de um veículo de custo reduzido, mais acessível para uma parcela maior da população.

1.1 PERSPECTIVAS ATUAIS DA ELETRIFICAÇÃO AUTOMOTIVA

Yang *et al* (2023) verificou, ao realizar uma análise sistemática da literatura, que diversos parâmetros socioeconômicos colaboram para a propagação da utilização de veículos elétricos (EVs, *Electric Vehicles*). Os efeitos mais positivos quanto à proliferação de carros elétricos híbridos resultaram de incentivos fiscais, do número de estações de carregamento e da presença de montadoras locais desses veículos.

Outrossim, as preferências individuais na adoção de EVs apresentam diferenças quanto a características da população, insinuando variabilidade na percepção da utilidade de veículos elétricos. Jia e Chen (2021), quando realizaram uma pesquisa de preferência declarada sobre a compra de EVs, notaram que gênero, idade, nível de escolaridade e renda anual são determinantes para o maior interesse pelo *powertrain* eletrificado.

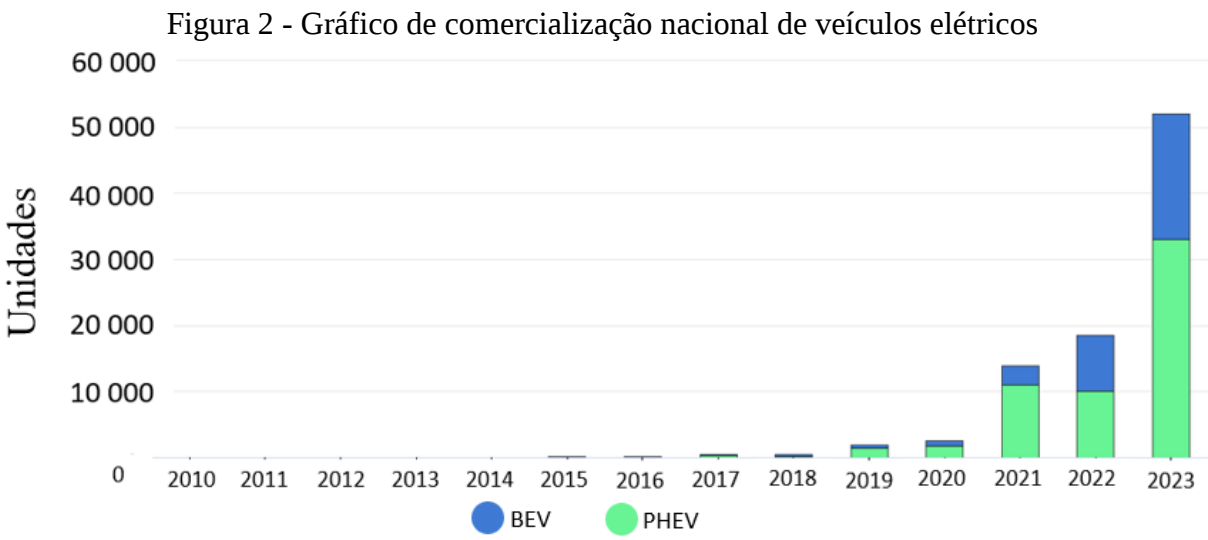
Segundo a Agência Internacional de Energia (2024), os dados entre 2010 e 2023 apresentam, como visto na Figura 1, a tendência de um grande aumento nas comercializações de automóveis com sistemas eletrificados. Em um período de 10 anos, ou seja, de 2014 a 2023, houve um crescimento de 41,8 vezes o total desse tipo de veículo. No último ano contabilizado, inclusive, as vendas somaram 13,8 milhões de automóveis, sendo a maioria de BEVs.



Fonte: Adaptado de IEA (2024).

No mercado brasileiro, de forma semelhante, porém menos aguda, o comércio de carros elétricos também é tendência, conforme explicitado pelas barras crescentes da Figura 2. Analisando-se os dados de 2015 a 2023, as vendas elevaram-se 852,5 vezes, número extremamente alto devido ao volume baixíssimo de vendas de EVs em 2015, que representaram 61 unidades.

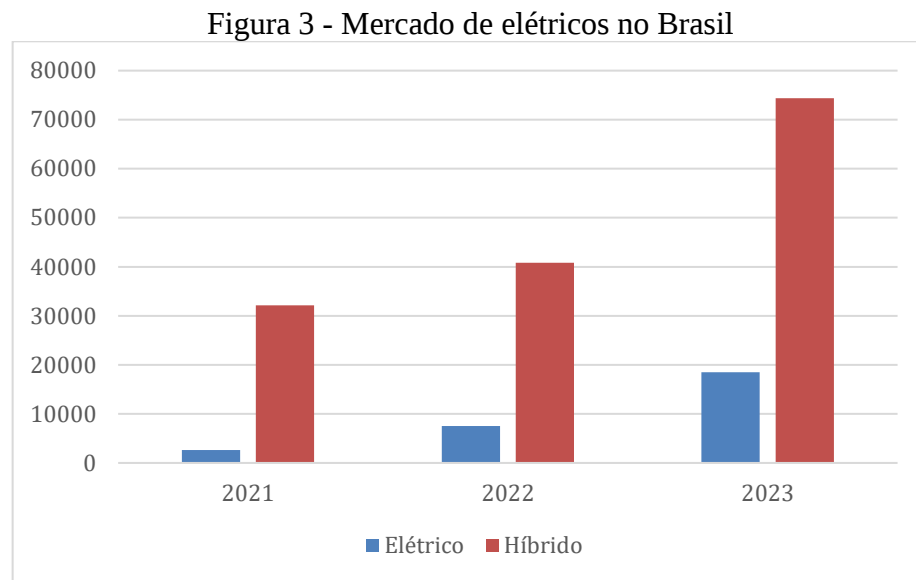
Assim, em uma avaliação mais adequada, comparando-se os mesmos valores a partir de 2020, o crescimento foi de 32,5 vezes, reiterando, de maneira comedida, a forte recepção do mercado aos elétricos.



Fonte: Adaptado de IEA (2024).

Confrontando-se o gráfico da Figura 2, mais amplo e fornecido por uma agência internacional, com uma fonte brasileira, é possível detalhar ainda mais o mercado no país. A FENABRAVE (2024), em seu relatório anual, simplificado na Figura 3, apontou que cerca de 93 000 veículos, entre híbridos e elétricos, foram vendidos em 2023, uma magnitude ainda mais expressiva que a apresentada pela IEA.

Outrossim, é notável a tendência repetida de comercializações de EVs, com os modelos somente à bateria tendo maior introdução nos últimos anos no mercado nacional.



Fonte: Adaptado de FENABRAVE (2024).

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A garantir a fundamentação teórica e a gerar resultados práticos, este projeto divide-se em uma pesquisa bibliográfica, que foi conduzida por ferramentas de pesquisa em bancos de dados de relevância, e no dimensionamento do sistema de *powertrain* do carro, com o memorial de cálculos e os modelos do veículo.

Para tanto, enumeram-se sete capítulos:

- O primeiro introduz o leitor à problemática e incita-o à solução proposta por este trabalho, detalhando brevemente o projeto.
- O segundo demonstra as justificativas, embasadas na literatura, para a existência deste trabalho, que também se apoia em programas recentes de inovação e sustentabilidade.

- Destacam-se, no terceiro capítulo, os objetivos buscados no desenvolvimento do trabalho, os quais não se limitam à especificação do motor e das baterias, mas complementam-se com as demandas de autonomia e com o *design* do veículo.

- No quarto capítulo expõe-se a revisão bibliográfica, a qual se inicia com a bibliometria para analisar as tendências de pesquisa quanto às palavras-chave deste trabalho, bem como o número de publicações anuais. Depois, foi disposta a literatura com os requisitos mais comuns de locomoção nas zonas urbanas. Ademais, explicam-se os componentes que foram utilizados nos sistemas de tração e de bateria, adicionando, também, alguns termos técnicos utilizados em todo o arquivo para se referir à sustentabilidade, às emissões e aos transportes.

- O quinto capítulo demonstra o material sobre o qual se posiciona o dimensionamento, a saber, o *design* do carro e suas principais dimensões. São expostos, também, alguns outros componentes do automóvel, como o chassi e a carroceria. Este capítulo contém, além disso, a metodologia para o dimensionamento do projeto, envolvendo equações para o memorial de cálculo da dinâmica veicular.

- Ao longo do quinto capítulo demonstram-se os resultados dos cálculos para dimensionamento do projeto, expondo velocidades, solicitações de força e potência do motor. Somam-se a eles os outros requisitos de projeto, como as relações de redução e a velocidade angular do motor elétrico. Não obstante, são especificados, sob a ótica dos cálculos teóricos, a bateria, o inversor, o motor e o redutor de velocidade.

- No sétimo capítulo, portanto, são discutidos os resultados obtidos, expondo decisões tomadas para os componentes especificados. Faz-se, ainda, uma discussão acerca da viabilidade do projeto, identificando sua compatibilidade financeira com o mercado nacional, e do caráter ambiental do veículo, próprio à sociedade orientada por metais sustentáveis.

2 JUSTIFICATIVA

A principal motivação a conduzir o presente trabalho é, inegavelmente, a necessidade de atenuação das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEEs). Nesse sentido, a literatura recente, conforme Albrechtowicz (2023) e Pereira (2023), alinha-se à tendência de diminuição de consumo de combustíveis fósseis e, dessa forma, almeja aos menores índices de gás carbônico emitido por processos.

No setor de transportes, no qual este trabalho é focado, a indústria segue as mesmas motivações, de modo que a eletrificação tem se tornado a opção mais frequente para os objetivos de sustentabilidade. Sanguesa *et al* (2021), então, salienta os expressivos aumentos na participação de mercado, em diversos países, dos veículos híbridos e elétricos no total de carros novos vendidos, durante o período de 2013 a 2020.

Ademais, não apenas a propulsão dos automóveis apresenta mudanças recentes, mas também sua própria carroceria, a qual tem se alterado em conformidade com o ambiente urbano moderno. Paiva *et al* (2021), ao conduzir uma extensa pesquisa bibliográfica sobre os assuntos mais recorrentes de mobilidade urbana, indica como as cidades inteligentes demandam soluções diferentes de transporte, mesmo com carros pessoais. Nesse sentido, há preferência por carros menores e mais eficientes energeticamente, tendo menos assentos para passageiros e, por isso, maior taxa de ocupação.

Por conseguinte, o projeto de um carro elétrico urbano é de suma importância para as cidades atuais e futuras e, paralelamente, para os habitantes que trafegam diariamente dentro do ambiente urbano. Com efeito, sendo sistemas decisivos para a concepção do veículo, a motorização e as baterias fazem-se objetos de estudo interessantes no desenvolvimento do trabalho.

2.1 MOTIVAÇÕES EM CONCORDÂNCIA A PROGRAMAS

Às justificativas apresentadas somam-se, na estruturação deste projeto, alguns objetivos e metas que são encontrados em programas de relevância nacional e internacional. Neles, com a máxima da sustentabilidade e da conservação do meio ambiente, há o intuito implícito do aumento da eficiência dos produtos e dos processos, além do incentivo a novas tecnologias em conformidade com o princípio da responsabilidade, citado anteriormente.

2.1.1 Motivações face aos ODS

Durante a Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU), a ONU (2015) definiu metas globais em benefício da sociedade e de seus integrantes, nomeadamente os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Sendo sugeridas para nortear as ações futuras de empresas e de governos, tais objetivos, então, foram pormenorizados em 17 tópicos, que preveem a diminuição de desigualdades e a garantia de uma humanidade harmoniosa com o ambiente em que reside.

A Figura 4 apresenta todos os ODS da agenda global, os quais compreendem desde assuntos relacionados ao acesso à alimentação e à educação, ao surgimento de indústrias inovadoras e também ao combate às mudanças climáticas.

Figura 4 - Identificação dos objetivos da ONU



Fonte: FEP (2021).

Ao orientar-se com os mesmos princípios, este trabalho, de tal modo, justifica-se novamente por enfatizar diretamente três objetivos, relacionados à energia limpa (objetivo 7), às cidades e comunidades sustentáveis (objetivo 11) e à ação contra o aquecimento global (objetivo 13).

De fato, a utilização da propulsão elétrica no veículo promove uma energia mais limpa para o transporte, reforçada por uma matriz energética renovável, age contra maiores emissões de GEEs, os quais estão relacionados à ampliação da mudança climática. O projeto compacto do carro, por sua vez, é adaptado às cidades modernas, que priorizam a funcionalidade do espaço urbano e a maior densidade de ocupação, rejeitando veículos grandes mas com um único passageiro.

2.1.2 Motivações face ao programa Mover

Quanto à relevância empresarial do projeto, nota-se sua conformidade às mais recentes conjecturas nacionais em prol da modernização da indústria. Nesse sentido, o Programa Mobilidade Verde e Inovação, do Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC, 2023), apresenta diversas metas e incentivos a fim de promover o avanço tecnológico da indústria automotiva no país.

Expandindo o Rota 2030, iniciado em 2018, o Programa Mover almeja à descarbonização das empresas do setor de mobilidade e logística, atuando, assim, a favor de tecnologias de baixo carbono. Dentre as inovações incentivadas, os indicadores podem ser dados por: fonte de energia para propulsão, consumo energético, potência do motor e reciclabilidade.

À eletrificação do motor e à construção de um carro compacto, de menor potência, é possível relacionar os objetivos, então, do programa nacional. Desse modo, nota-se a compatibilidade do projeto com as diretrizes mais modernas da indústria do país.

3 OBJETIVOS

Em conformidade com as justificativas apresentadas na seção 2, é válido, então, destacar quais são os objetivos deste trabalho. Por conseguinte, devido ao intrincado conjunto de parâmetros para o desenvolvimento do carro, faz-se necessário dividir os objetivos em geral e em específicos.

3.1 OBJETIVO GERAL

Idealizar e especificar os sistemas de propulsão e de baterias do carro elétrico urbano, nomeando o motor elétrico e os componentes da fonte de energia com base em cálculos de dinâmica veicular. Dá-se origem, assim, a um projeto veicular sustentável e adaptado à mobilidade urbana.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

À execução do trabalho acompanham diversas etapas que, paralela ou sucessivamente, devem ser completadas a fim de se progredir no objetivo geral. Assim, os próximos parágrafos, dispostos em tópicos, discorrem sobre esses objetivos específicos.

- Pesquisar as necessidades comuns dos moradores de áreas urbanas quanto às distâncias de locomoção diária, evidenciando, de tal modo, a autonomia desejável.
- Selecionar um modelo para o carro urbano e estabelecer suas especificações preliminares. Para tanto, devem ser utilizados modelos tridimensionais produzidos anteriormente, contendo as principais dimensões do veículo.
- Calcular as forças durante o deslocamento veicular em diversas situações de uso conforme as velocidades preestabelecidas e estimar o torque demandado nas mesmas situações.
- Dimensionar o *powertrain* para o veículo compacto urbano, comparando as potências necessárias e as disponíveis para o motor e para o sistema de transmissão.
- Especificar, sabendo a demanda de potência e de autonomia, as baterias e criar cenários para a utilização do veículo, o que pode afetar o tamanho e a capacidade do sistema de armazenamento de energia.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A elaboração do presente trabalho envolve, concomitantemente, seções teóricas, de revisão, e experimentais, de dimensionamento e de projeto. Por conseguinte, é mister identificar a literatura científica utilizada para o embasamento teórico do trabalho, a qual se revela como o material para a concepção dos sistemas de propulsão e de baterias. Em convergência com o conteúdo relevante obtido, almeja-se elaborar uma revisão bibliográfica para unir os pontos comuns da literatura, criando a coesão necessária para os conhecimentos de engenharia necessários aos subsistemas do veículo.

4.1 MÉTODO DE PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

O processo de pesquisa de material bibliográfico foi, inexoravelmente, dividido em áreas da ciência. Desse modo, o desenvolvimento de cada tópico envolveu uma nova etapa de revisão, ainda que as ferramentas fossem, evidentemente, as mesmas.

Nesse caso, para conduzir as pesquisas, foi utilizado um extenso banco de dados com diversos conteúdos de relevância científica e industrial, o *Scopus*. Com os comandos dispostos por ele, foi possível, utilizando palavras-chave, obter o conteúdo para fundamentar os conceitos dos carros com propulsão eletrificada, de modo que a apuração do material mais interessante se deu pela aplicação de filtros específicos, que garantem maior capilaridade do tema.

Não obstante, foi percebida a necessidade de ampliar a base de dados para recolher mais publicações de âmbito nacional, com ênfase na realidade do país. Portanto, também foi utilizada a plataforma Periódicos CAPES para revisão bibliográfica. Por meio dela foi possível filtrar o conteúdo mais relevante para o trabalho e, assim, identificar fatores concernentes ao Brasil, como a matriz elétrica e o mercado automotivo.

4.2 BIBLIOMETRIA

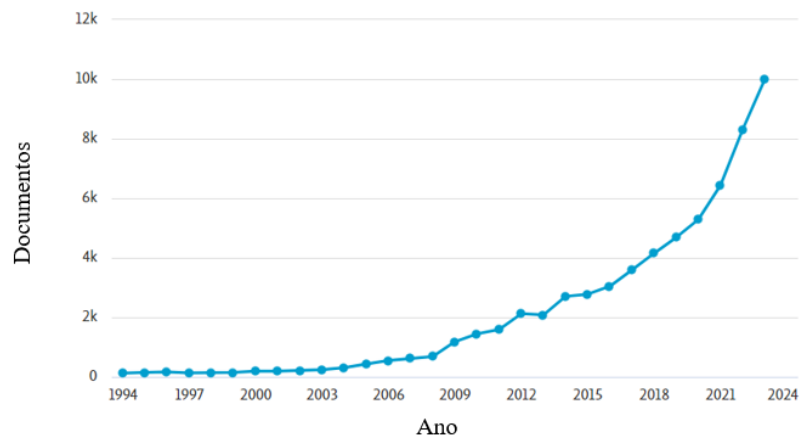
Com o intuito de analisar se as linhas de pesquisa exploradas neste trabalho convergem com as publicações mais recentes em bancos de dados de relevância, exploram-se, neste tópico, o número de artigos de acordo com algumas palavras-chave.

Inicialmente, foi necessário medir como o tópico principal deste trabalho se comportou de 1994 a 2024: utilizando os termos “*battery*”, “*electric*” e “*vehicle*”, foi possível, com a ferramenta de análise do *Scopus*, elaborar o gráfico da Figura 5, que demonstra a quantidade

anualizada de conteúdos divulgados. É possível notar a o coeficiente angular da curva cada vez maior, indicando uma tendência quase exponencial do assunto. Nos últimos quatro anos, observou-se um crescimento de 89,1% nas publicações nesta área.

Figura 5 - Gráfico da bibliometria de “*Battery electric vehicle*”

Documentos por ano

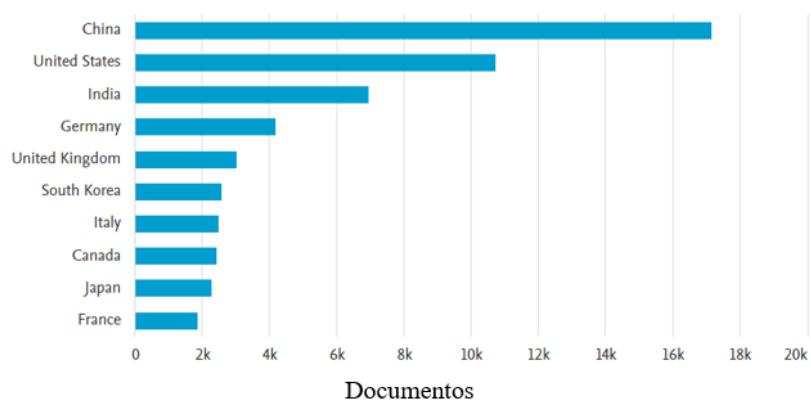


Fonte: Adaptado de *Scopus* (2024).

Complementando a pesquisa sobre frequência por período, é relevante observar o país de origem de maior parte dos documentos. A Figura 6, então, mostra os 10 países que mais contribuíram para o tema de “*Battery electric vehicle*”, de modo que a China tem considerável vantagem sobre os Estados Unidos, que ocupam o segundo lugar. Notam-se, assim, os investimentos que foram feitos, no país, em prol das inovações tecnológicas, importantes para uma economia em desenvolvimento.

Figura 6 - Publicações por país sobre o tema “*Battery electric vehicle*”

Documentos por país

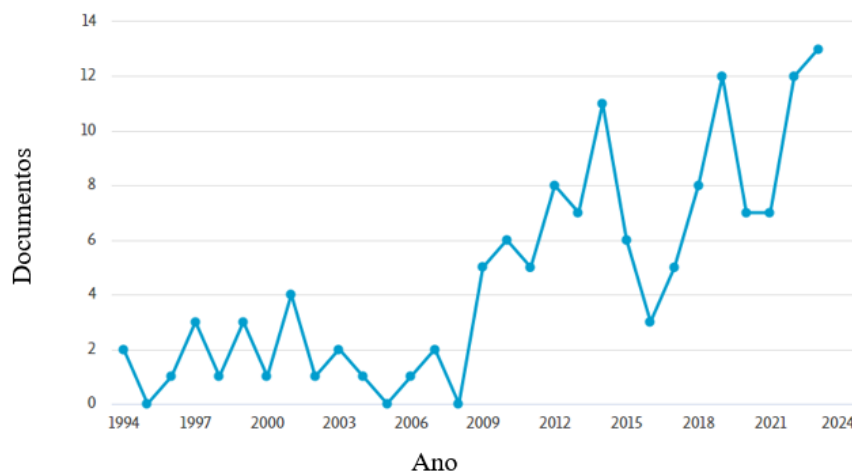


Fonte: Adaptado de *Scopus* (2024).

Ademais, quanto à especificidade do modelo do carro, que deve ser compacto, foram utilizados, para análise, os termos “*urban*”, “*small*”, “*electric*” e “*car*”, pretendendo buscar artigos particularizados para o tema. O resultado foi plotado na Figura 7, cujo gráfico representa, novamente, as publicações anuais do assunto. Observa-se, apesar das grandes variações entre anos sucessivos, que a tendência também é de crescimento, ainda que inconstante.

De 2020 a 2024, o aumento foi de 85,7%, mas esse valor pode ter sido afetado diretamente pela pandemia de Covid-19, já que apresentou brusca redução em relação ao ano de 2019. Todavia, ao se explorar um período de cinco anos, a diferença de publicações foi 8,3% maior, o que redonda, ainda, na tendência de crescimento desse tema.

Figura 7 - Gráfico da bibliometria de “*Urban small electric car*”
Documentos por ano

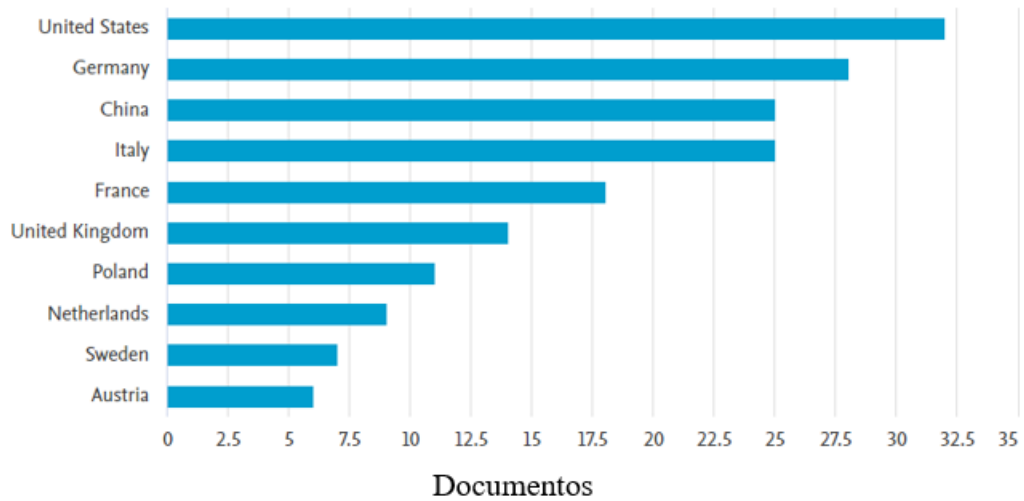


Fonte: Adaptado de *Scopus* (2024).

A Figura 8 demonstra os países que detêm os maiores números de arquivos publicados referentes à mobilidade urbana no tema explorado. Nesse sentido, nota-se maior participação dos Estados Unidos e de países da Europa, bem como da China, de modo que, ao menos no país americano, percebe-se uma certa alteração de preferências, dado o histórico de veículos grandes comercializados no país.

A Europa e a China, por outro lado, já possuem carros compactos com representação perceptível no mercado automotivo, o que pode ser efeito de preferências culturais e também para se adaptar às antigas vias públicas, mais estreitas, das cidades ancestrais dessas sociedades.

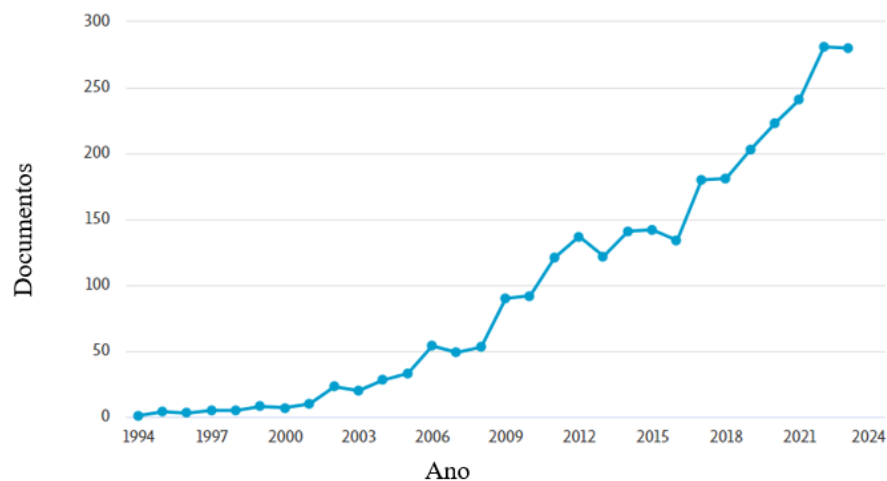
Figura 8 - Publicações por país sobre o tema “*Urban small electric vehicle*”



Fonte: Adaptado de Scopus (2024).

Quanto à caracterização do sistema de tração, foi avaliado o tema com as seguintes palavras-chave: “*electric*”, “*motor*” e “*powertrain*”. A Figura 9 demonstra, logo, as publicações ano a ano desde 1994: observa-se um crescimento significativo, ainda mais acentuado a partir de 2019. Avaliando a alteração nas postagens nos últimos quatro anos, observou-se um crescimento de 25,6% no número de publicações quanto ao tema.

Figura 9 - Gráfico da bibliometria de “*Electric motor powertrain*”
Documentos por ano



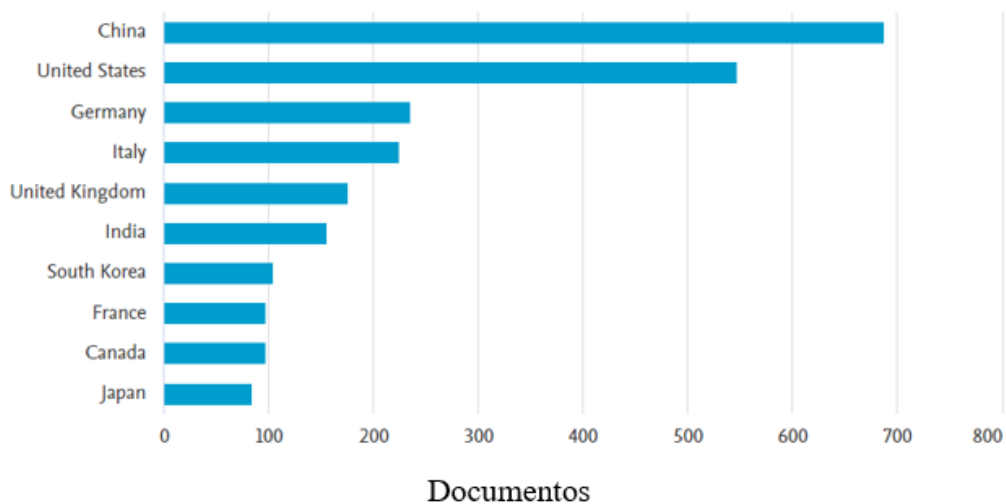
Fonte: Adaptado de Scopus (2024).

Foram analisadas, ainda neste tema, a quantidade de arquivos criados por país nesse período. Na Figura 10 veem-se os resultados, os quais colocam a China em primeiro lugar, seguida por Estados Unidos e Alemanha. De modo semelhante à bibliometria dos temas

anteriores, o país asiático demonstra engajamento nas pesquisas de eletrificação de meios de transportes, fato que representa uma oportunidade de inovação e de alinhamento às exigências de sustentabilidade globais.

Nota-se, também, que os dois primeiros colocados contribuem com, aproximadamente, 52% da literatura dentro dos 10 principais países na pesquisa. Desse modo, notam-se os esforços das duas maiores economias globais quanto ao desenvolvimento de sistemas de tração com motores elétricos.

Figura 10 - Publicações por país sobre o tema “*Electric motor powertrain*”



Fonte: Adaptado de *Scopus* (2024).

4.3 HISTÓRIA E PANORAMA ATUAL DOS CARROS ELÉTRICOS

Neste tópico de revisão, foram dispostas as informações acerca do surgimento e do desenvolvimento dos carros elétricos, bem como a situação atual desses veículos no mundo. Além da importância de se entender os aspectos quanto à origem da tração elétrica, esta seção também evidencia alguns dos motivos pela desvalorização dos veículos ao longo do século XX

4.3.1 Surgimento e desenvolvimento dos modelos elétricos

Apesar de sua popularidade recente, os carros elétricos surgiram próximos sob a ótica da história automotiva. Barber (2021), quando estudou o desenvolvimento dos automóveis, afirmou que o primeiro carro elétrico foi construído em 1891 por William Des Moines, em Iowa, Estados Unidos. Alguns anos antes, em 1885, o alemão Carl Benz criou o primeiro

automóvel de rua com um motor à combustão interna (MCI), tal qual o autor confirmou, e que se tornou referência para os veículos posteriores pelas suas praticidade e possibilidade de construção em série.

Ainda assim, Purdy *et al* (2024) constatou que, antes de Benz construir um automóvel utilizável nas cidades, o francês Gustave Trouvé elaborou, com base em melhorias nos sistemas de armazenamento de energia por Camille Faure, um triciclo elétrico. Tal veículo percorreu, em 1881, as ruas de Paris, demonstrando a evolução tecnológica no velho continente.

O autor também reitera a grande popularidade dos carros elétricos durante os primeiros anos da indústria automotiva. “No início do século 20, 40 por cento dos automóveis americanos eram propulsionados por vapor, 38 por cento por eletricidade e 22 por cento por gasolina” (PURDY *et al*, 2024, tradução do autor).

No entanto, apesar dos benefícios dos carros elétricos na época, como a facilidade de acionar o motor a partir do repouso, o silêncio de condução e a pequena necessidade de manutenção, a eletricidade cedeu, nos anos seguintes, lugar à gasolina e a outros combustíveis fósseis. Nesse sentido, segundo Alcoforado (2022), a produção em massa dos modelos Ford e as inovações dos motores à combustão interna diminuíram o interesse e os investimentos nos automóveis elétricos, que careciam de autonomia e de infraestrutura para carregamento.

A partir de então, segundo o INL (2016), a fabricação de automóveis elétricos foi retomada incisivamente nas décadas de 60 e 70, quando se buscavam alternativas de fontes de propulsão. Naquele momento, devido às dependências de importação de petróleo por muitos países, e conforme os aumentos arbitrários no preço dos barris do hidrocarboneto, o objetivo era criar uma certa independência energética.

Além disso, entre o final do século XX e o início do XXI, as legislações começaram a incentivar o desenvolvimento da tração elétrica nos veículos. Tais ações movimentavam-se a fim de atender às demandas de entidades relacionadas à preservação do meio ambiente, buscando formas de propulsão com menores índices de emissão de GEEs.

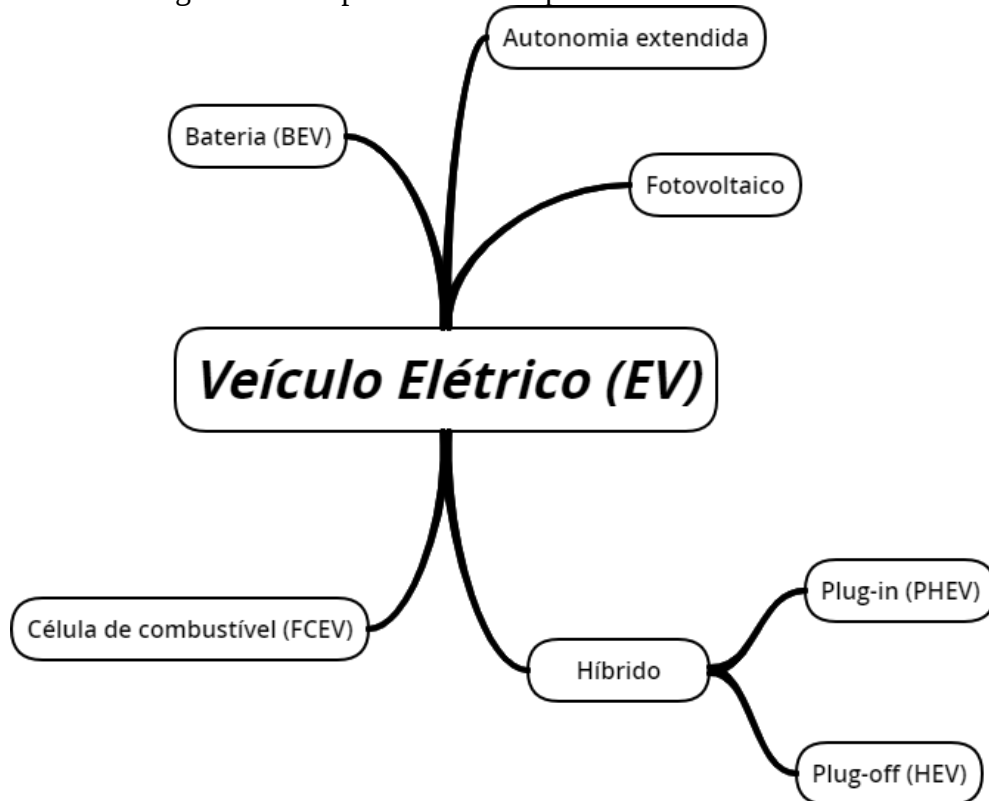
4.3.2 Tipos de carros elétricos

A eletrificação do *powertrain* dos veículos é observada a partir de diversas configurações. Assim, Wilberforce *et al* (2017) indicou a classificação que divide os carros elétricos em três tipos: os de baterias (BEV, *Battery Electric Vehicle*), os de célula à combustível (FCEV, *Fuel Cell Electric Vehicle*) e os híbridos (HEV, *Hybrid Electric Vehicle*).

Desse modo, e atualizando com algumas variações, a Figura 11 contém um mapa mental que elucida as formas pelas quais a eletrificação se desenvolve.

Na Figura 11, assim, todos os veículos possuem algum tipo de bateria: os BEVs possuem a maior, visto que o carro necessita apenas dela para toda sua autonomia. Além deles, a sequência decrescente do tamanho de bateria é dada: carro fotovoltaico, de autonomia estendida, à célula de combustível, híbrido plug-in e híbrido plug-off. Assim, normalmente, quando se tem um MCI para gerar potência para as rodas, as baterias podem ser diminuídas, mesmo que as emissões ainda sejam um pouco mais altas que os outros sistemas de propulsão elétrica.

Figura 11 - Mapa mental dos tipos de veículos elétricos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

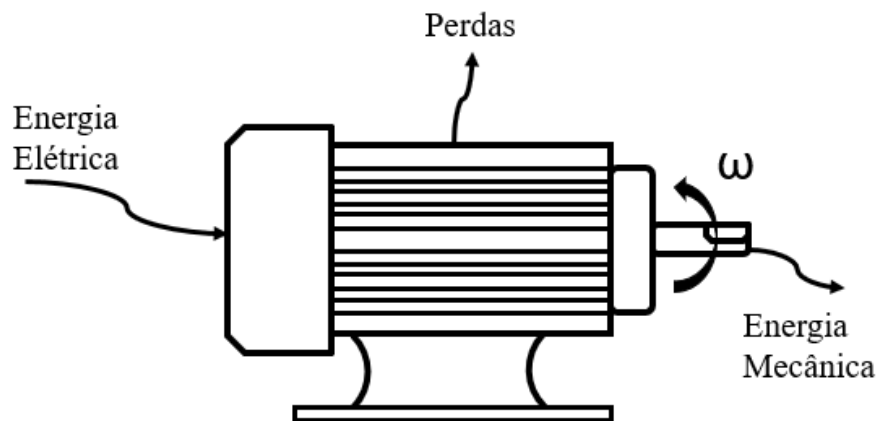
4.4 MOTORES ELÉTRICOS

Provenientes de anos de pesquisa em prol de suas multifacetadas aplicações, os motores elétricos, assumindo diversos tipos de construção, possuem diversas configurações e objetivos, mas têm o funcionamento baseado na Figura 12. Dessa forma, os motores funcionam pela

entrada de energia elétrica no sistema e pela conversão em energia mecânica em um eixo giratório.

A despeito da pluralidade de modelos, no geral, os motores elétricos têm eficiência muito maior que os motores à combustão atualmente empregados pela indústria automotiva, tornando-os atrativos para a causa ambiental.

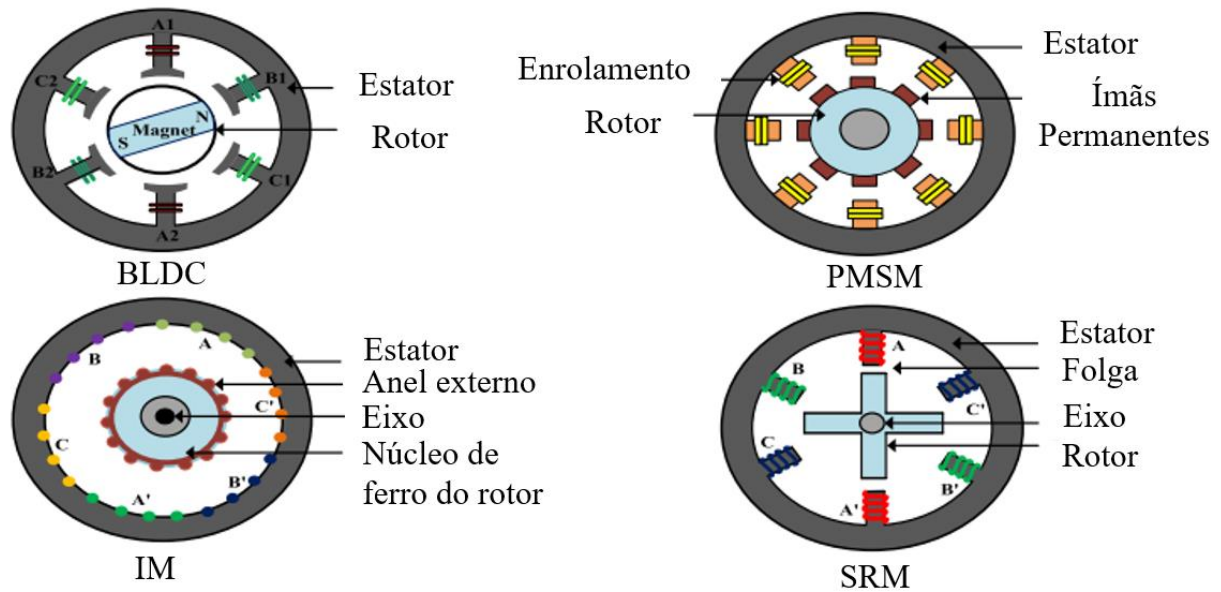
Figura 12 - Esquema simplificado de um motor elétrico



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Nesse sentido, Thangavel *et al* (2023) conduziu uma revisão sistemática acerca dos principais modelos de tração elétrica disponíveis para a mobilidade. A Figura 13, incluída em sua pesquisa, demonstra esquematicamente as estruturas de cada tipo de motor elétrico que são os mais utilizados atualmente na condução veicular. Nota-se, a princípio, que todos os motores têm construção circular, indicando que a energia mecânica gerada já está na forma de rotação do eixo, diferentemente dos MCIs, que convertem o movimento linear dos pistões a partir do virabrequim.

Figura 13 - Esquema simplificado de um motor elétrico



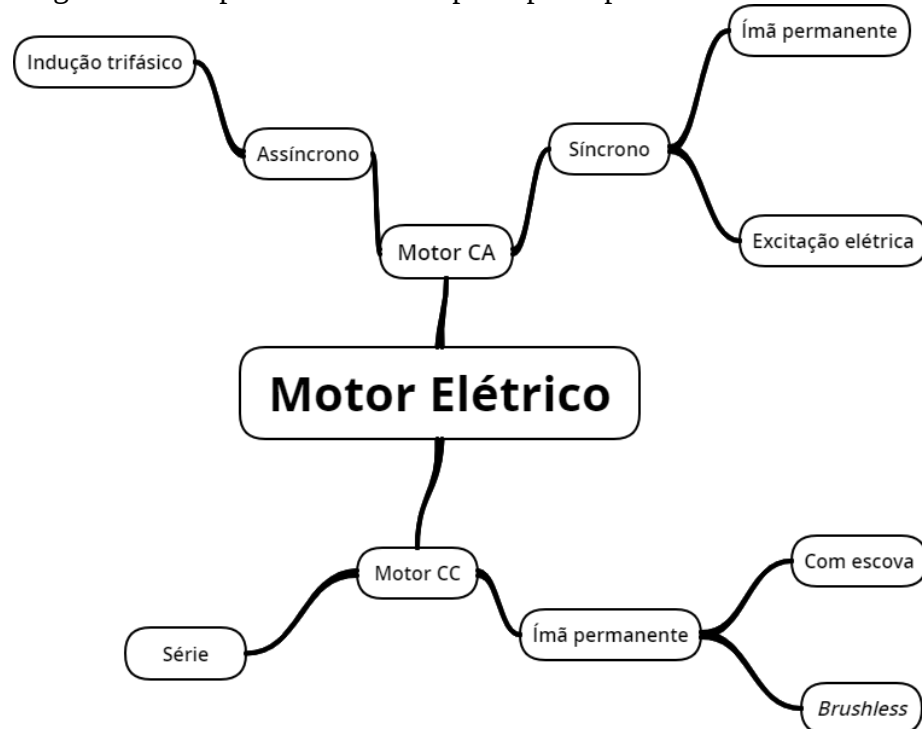
Fonte: Thangavel *et al* (2024).

Thangavel *et al* nomeia os quatro tipos de arranjos da Figura 13 como: motor de corrente contínua sem escovas (BLDC), motor síncrono de ímãs permanentes (PMSM), motor de indução (IM) e motor de relutância variável (SRM).

O autor descreveu alguns dos principais obstáculos nas aplicações de cada motor, sendo que o PMSM e o SRM têm custos elevados e este também possui aquecimento por desmagnetização e vibração por flutuação de torque. Já o BLDC, ainda mais caro que o motor de indução, pode apresentar problemas na confiabilidade do comutador. O IM, por sua vez, apresenta menor eficiência que os demais, somadas as maiores perdas, constantes e variáveis, dos materiais que o compõem.

Assim, com base em Thangavel *et al* e WEG (2023), a Figura 14 apresenta um resumo com diversos tipos de motores elétricos disponíveis no mercado. Além da notável multiplicidade de modelos, percebe-se uma divisão entre duas configurações básicas: os motores de corrente alternada e os de corrente contínua.

Figura 14 - Mapa mental com os principais tipos de motores elétricos



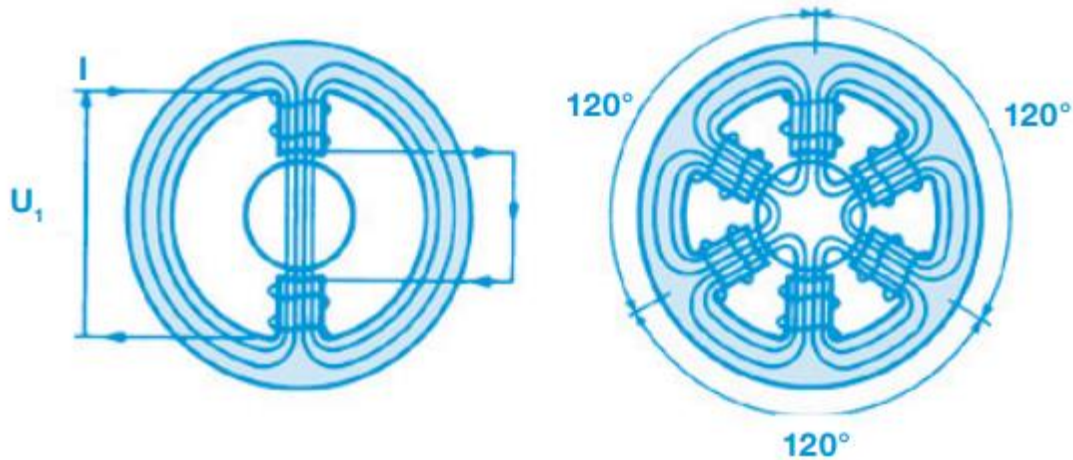
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Segundo a WEG, os motores elétricos mais utilizados mundialmente são os de indução, que pertencem ao grupo de equipamentos de corrente alternada. Neles, como afirmou a WEG, o estator está conectado à rede de alimentação e as correntes presentes no rotor formam-se exclusivamente pela indução do próprio estator. A rotação do eixo se dá, nesse caso, pelo fenômeno dos campos magnéticos girantes, os quais surgem da corrente que percorre as bobinas enroladas no estator.

Tal situação pode ser observada na Figura 15 em duas situações: um enrolamento monofásico, à esquerda, e um trifásico, à direita. No primeiro caso, um único campo magnético surge, o qual é pulsante se a corrente for alternada, dado ele variar sua intensidade de acordo com ela.

No caso trifásico, todavia, surgem três campos espaçados em 120° entre si, de modo que o tempo entre eles também é defasado, sugerindo um gráfico como o da Figura 16.

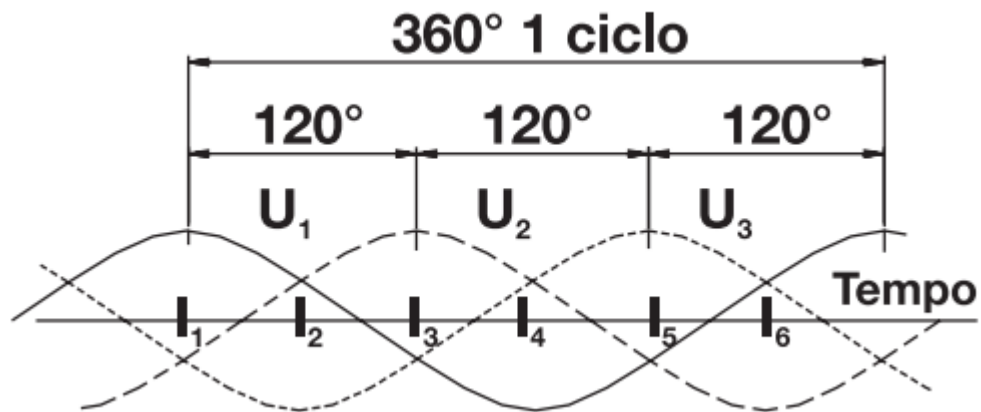
Figura 15 - Campos girantes do motor de indução



Fonte: WEG (2023).

A associação das tensões U_1 , U_2 e U_3 , assim, forma o gráfico da Figura 16, em que se notam as curvas das correntes com uma diferença constante entre os picos e os vales.

Figura 16 - Gráfico da corrente no enrolamento trifásico



Fonte: WEG (2023).

4.4.1 Equacionamento do motor

A fim de verificar se determinado motor é adequado às solicitações dinâmicas do automóvel, convém detalhar alguns parâmetros mecânicos que envolvem as dimensões do motor.

Nesse caso, a partir de uma potência fixa é possível determinar o torque para cada velocidade do motor, conforme a equação (1), de modo que é possível avaliar se, para certa

rotação, o motor é capaz de entregar o torque solicitado pelas rodas. Nota-se, a princípio, que o torque é inversamente proporcional às rotações do motor e, então, deve ser cada vez menor à medida que o carro aumenta sua velocidade.

$$T_{motor} = \frac{P \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (2)$$

Onde T_{motor} é o torque do motor, P é a potência e n é o número de rotações do motor.

No entanto, o torque fornecido pela equação é gerado no eixo do motor, sendo que ele sofre alterações de grandeza até chegar às rodas, vistas as relações de redução fornecidas pelo sistema de transmissão. Logo, a equação (3) é mais adequada para comparações diretas com as demandas da pista. Nela, é observada a inclusão da proporcionalidade a partir da relação de transmissão, que tende a ser maior que 1 e aumenta o torque disponível.

$$T_{roda} = T_{motor} \cdot i \quad (3)$$

Onde T é o torque da roda e do motor e i é a corrente elétrica.

4.5 BATERIAS

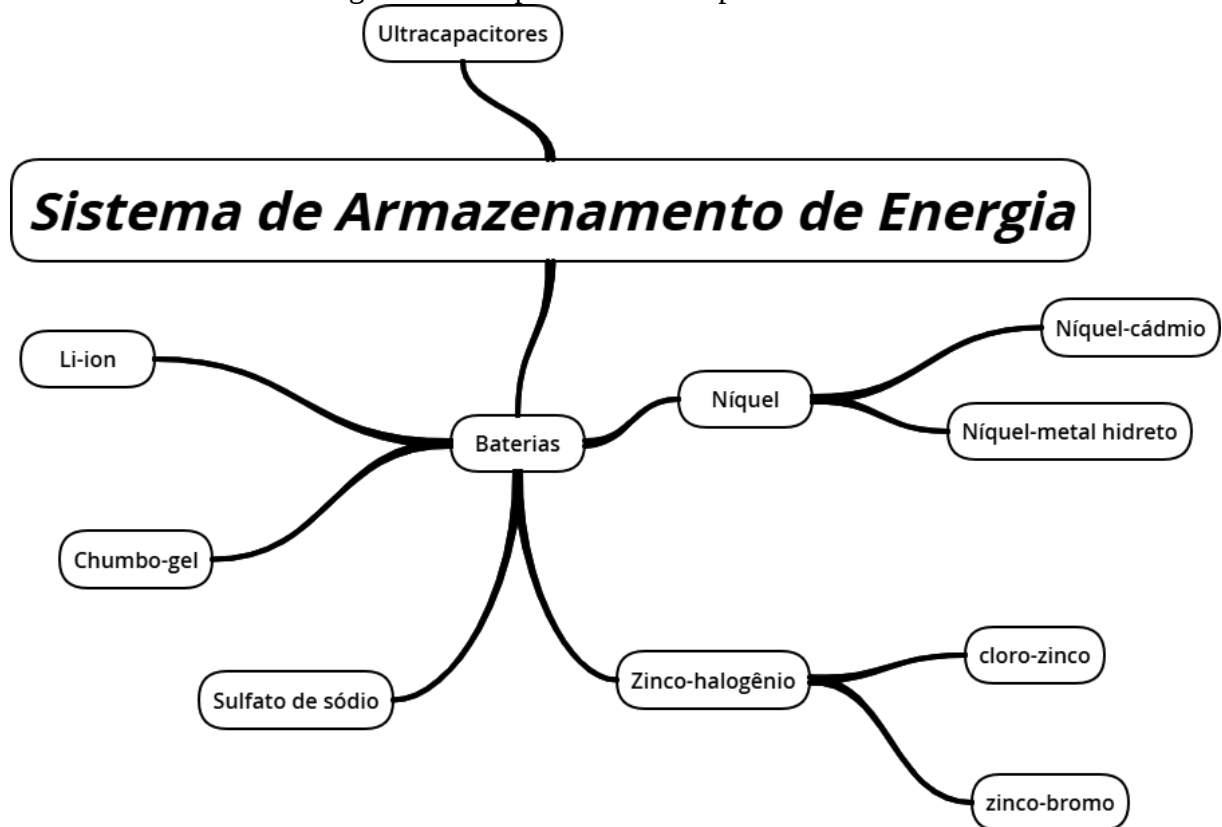
Essenciais aos carros elétricos, as baterias constituem a fonte de armazenamento de energia para a tração eletrificada. Tal qual afirmou Zhang *et al* (2021), os chamados ESS (*Energy Storage Systems*) têm tido papel crucial para o crescimento da oferta de energias alternativas na sociedade. Os veículos elétricos, ao solicitarem eletricidade constante e em corrente e tensão suficientes para o *powertrain*, utilizam, atualmente, baterias químicas modernas, resultados de grandes avanços da técnica.

Neste capítulo, então, são apresentados os principais tipos de baterias que comumente são inseridas nos veículos elétricos, de modo que o mapa mental da Figura 17 cita esses e alguns modelos extras.

Segundo a Knauf (2020), as baterias baseadas em lítio são as mais utilizadas atualmente. Por sua alta eficiência e pela massa reduzida, elas podem ser utilizadas em diversos tamanhos e oferecem capacidade de energia para diversos tamanhos de veículos. Quanto ao preço, de acordo com o documento publicado em 2020, as baterias de lítio já são competitivas.

Ademais, conforme a Knauf (2020), as baterias de níquel apresentam a vantagem da grande vida útil em comparação com as demais. No entanto, ela possui desvantagens como a perda de energia armazenada quando não está sendo utilizada e o custo elevado. As baterias baseadas em chumbo, por sua vez, têm alta potência, apesar da pior densidade energética entre esses três modelos revisados. Apesar do custo, que é baixo, e da alta confiabilidade, elas podem adicionar massa elevada ao projeto, afetando o desempenho do veículo.

Figura 17 - Mapa mental dos tipos de baterias



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.6 MOBILIDADE URBANA

Presentes as tendências exploradas na seção 1.1, a eletrificação dos sistemas de tração é um dos traços mais notáveis das modificações da mobilidade citadina. No entanto, há outras inovações que explicitam como os mercados reagem ao crescimento das cidades e à incorporação de sistemas digitais nos carros.

Nesse sentido, Butler, Yigitcanlar e Paz (2020) afirmaram, em uma revisão sistemática, que os mercados automotivos trabalham para adicionar e desenvolver inteligência artificial nas frotas urbanas. Para tanto, os autores seguiram os denominados critérios de avaliação

sustentável, que compreendem a segurança, o congestionamento, o consumo de energia, o ambiente e a acessibilidade. A maior coleta de dados e a sua subsequente avaliação em tempo real, como a inteligência artificial propõe, permitirão às frotas modernas melhor coordenação do tráfego e gerenciamento do consumo de energia.

Ademais, segundo artigo publicado pela BMW (2019), outra tendência que foi observada nas grandes cidades é o compartilhamento dos carros, no qual se paga pelo aluguel do veículo pelo seu tempo de uso, evitando custos de manutenção a longo prazo. Um dos objetivos desse fenômeno é maximizar a utilização dos espaços, evitando o estacionamento de diversos carros que carregam poucos passageiros.

Não obstante, a fim de avaliar o tamanho dos transportes, é válido comparar alguns carros modernos, notando-se a diferença de peso entre eles. Na Tabela 1 estão representados carros compactos urbanos, como o proposto neste trabalho, de modo que as médias de peso são 962 kg para os de MCI e 1110 kg para os carros elétricos.

Tabela 1 - Comparativo de massa de carros compactos

Motorização	Modelo	Peso [kg]	Potência [CV]	Peso/Potência [kg/CV]
MCI	Fiat MOBI	961	74	12,99
MCI	Renault Kwid	818	71	11,52
MCI	Citroën C3	1051	75	14,01
MCI	Smart Fortwo	995	84	11,85
MCI	Volkswagen up	987	82	12,04
Elétrica	Renault Kwid e-tech	977	65	15,03
Elétrica	Citroën C-zero	1140	64	17,81
Elétrica	Smart Fortwo electric	1095	81	13,52
Elétrica	Volkswagen e-up	1229	83	14,81

Fonte: Adaptado de Liu *et al* (2021).

4.7 TRAJETOS URBANOS

Conforme a mobilidade humana se altera e as concentrações urbana passam a abrigar cerca de 61% da população, totalizando 124 milhões de pessoas (IBGE, 2022), as distâncias diárias percorridas também se modificam.

Conforme a CNT (2017), em uma pesquisa conduzida em municípios com mais de 100 mil habitantes, a distância média percorrida por cada cidadão dependia do motivo de sua viagem, sendo o trabalho a mais constante e, também, aquela com maior quilometragem aferida:

cerca de 13,3 km. O tempo médio de viagem, nesse caso, é de 38 minutos, de modo que o estudo apontou a correlação entre o crescimento dos municípios com a elevação do tempo de viagem.

Nos maiores municípios analisados pela pesquisa da CNT, aqueles cuja população é maior que 3 milhões de habitantes, o tempo médio percorrido pelos cidadãos pode chegar a 46 minutos.

Não obstante, os outros objetivos dos trajetos também foram revelados, bem como suas distâncias médias. Para estudar, o deslocamento necessário aferido foi de, aproximadamente, 9,5 km; para tratamentos de saúde, cerca de 11,4 km; e para outros motivos, cerca de 8,4 km. Por conseguinte, é possível observar que os trajetos mais comuns ficam próximos aos 10 km de distância.

4.7.1 Inclinação das vias

Principalmente nas áreas urbanas, onde as cidades crescem num misto imprevisível de planícies e ladeiras, a inclinação das ruas pode afetar significativamente o desempenho dos automóveis. Ainda assim, apesar de em muitos casos haver a nítida impressão de que um aclive é muito íngreme, pesquisas práticas demonstram que a inclinação não é, de fato, tão elevada.

Nesse ínterim, Silveira (2007) estudou as inclinações mais comuns nas situações cotidianas e estabeleceu alguns valores conforme a declividade percentual, que é uma forma de se referir à tangente do ângulo de inclinação. Foi constatado que nas rodovias os aclives de 8,75% são raros, ao passo que nas cidades, as ruas com declividade de 26,80% são excepcionais, de modo que poderiam ser consideradas situações críticas para projetos.

No entanto, Silveira calculou magnitudes máximas, hipotéticas, para a inclinação de uma rua, avaliando a proporcionalidade entre a componente do peso paralela à pista e a força de atrito dos pneus. A equação (4) representa, por conseguinte, relação da inclinação com o atrito, de modo que, quanto maior o coeficiente deste, mais elevado pode ser aquele.

$$\theta < \arctan\left(\frac{\mu_e}{2}\right) \quad (4)$$

Logo, partindo-se do coeficiente de atrito estático igual a 1 – situação muito favorável – é possível estimar a máxima inclinação em algo próximo à 50,95%, ou 27°.

Somando-se a essas conclusões as capacidades de desempenho ofertadas por fabricantes de carros elétricos compactos, é possível estimar como o mercado reage face às inclinações.

Como afirmou a Alkè (2024), montadora italiana de utilitários e compactos elétricos, um veículo com tração eletrificada tende a subir aclives com inclinação de até 20%, ou seja, cerca de 11°. A Tabela 2 representa, com base nisso e resumidamente, os aclives que alguns tipos de automóveis foram projetados para transpassar. No geral, nota-se que inclinações da ordem de 20° são reservadas para carros adaptados aos terrenos íngremes.

Tabela 2 - Capacidade dos veículos para aclives

Inclinação	Tipo
< 20%	Elétrico urbano
25%	Utilitário elétrico
35%	Off-road elétrico
>50%	Off-road 4x4

Fonte: Adaptado de Alkè (2024).

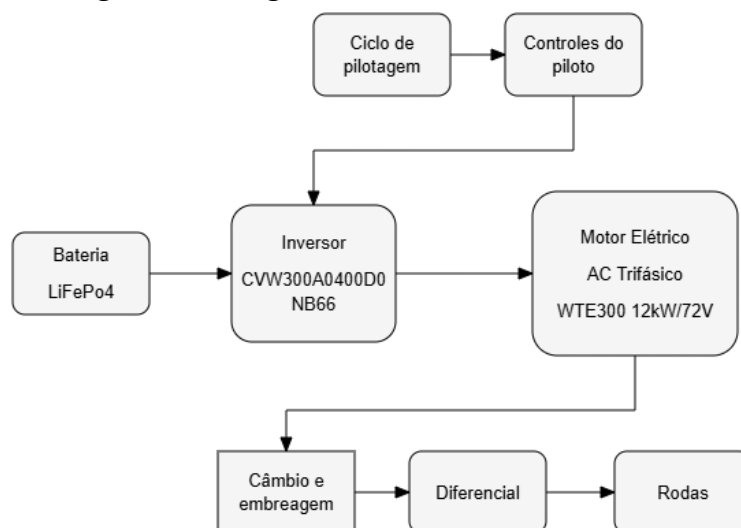
5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os cálculos para as especificações do motor e das baterias demandam parâmetros adrede obtidos das dimensões e das necessidades do projeto. Conforme os cálculos avançam, geralmente com estimativas das primeiras etapas do *design*, este pode evoluir para fornecer detalhes pormenorizados, aumentando a precisão e a confiabilidade dos cálculos, num processo cíclico.

Por conseguinte, nesta seção foram detalhados os materiais que serviram de base para o design e para os parâmetros de cálculo. Não obstante, foram citados os métodos e os programas para a modelagem e a análise do veículo.

Ademais, na Figura 18 está disposto o diagrama de funcionamento de um carro eletrificado, com alguns componentes exemplificados. Excetuando-se o ciclo de direção e o controlador, utilizados para simulações, os outros blocos contém peças que compõem os sistemas de tração e transmissão do veículo. O fluxo de energia pode ser visualizado na Figura 18, de modo que o reservatório inicial é a bateria e, as rodas, o destino final no veículo. Nesse caso, a energia passa de química, nas baterias, para elétrica e, enfim, mecânica ao atingir as rodas.

Figura 18 - Diagrama de blocos do carro elétrico



Fonte: Cadorini Neto (2023b)

Apesar de representar um veículo, no entanto, a *gear-box*, ou seja, caixa de marchas, é opcional em determinados modelos, com efeito que, para o carro deste projeto, decidiu-se retirá-la, facilitando a montagem.

5.1 MODELO DO CARRO URBANO

No que tange ao dimensionamento da motorização e da fonte de energia, é indispensável o *design* do conceito do carro, do qual são extraídos diversos parâmetros para os cálculos e para a validação dos componentes especificados.

5.1.1 Exemplo base de carro elétrico

Inicialmente, notou-se a importância de basear os primeiros desenhos do projeto em um veículo elétrico já construído, garantindo dimensões e geometrias mais acertadas. Para tanto, foram estudados alguns parâmetros do veículo elétrico da Figura 19, um carro da montadora Kandi, o EV 5010.

Observa-se, na figura, que o carro é significativamente compacto, possuindo 3 portas (2 portas laterais mais o porta-malas) e espaço para apenas o piloto e um passageiro. O espaço traseiro é dedicado para o transporte de carga, de modo que o veículo é uma espécie de furgão, com divisão clara dos objetivos dos espaços.

O motor é traseiro e fica sob o assoalho do porta-malas, posicionado próximo ao eixo traseiro, de modo que a tração é fornecida pelas rodas posteriores. O banco de baterias, como está demarcado na Figura 19, localiza-se na parte inferior do veículo, no espaço entre eixos.

Figura 19 - Carro elétrico Kandi EV 5010



Fonte: Cadorini Neto (2023).

5.1.2 Design da carroceria

O modelo desenvolvido por Cadorini Neto (2023a) está apresentado na Figura 20 e, conforme a renderização, nota-se um veículo compacto de apenas duas portas com carroceria do tipo *hatch*.

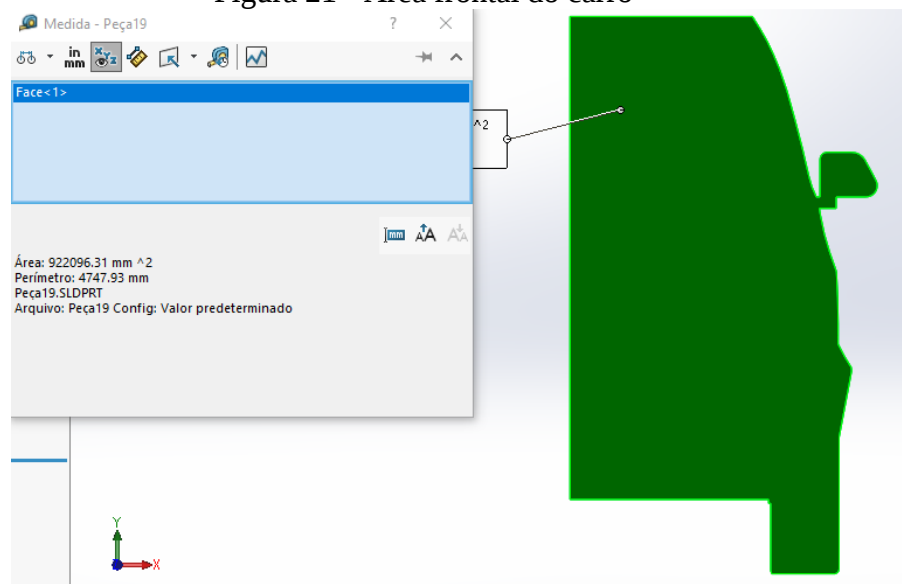
Figura 20 - Projeto da carroceria do carro elétrico



Fonte: Cadorini Neto (2023a).

Com base na carroceria proposta, é possível extrair diversas características do carro, como as dimensões principais, que também foram utilizadas para o equacionamento dinâmico do trabalho. Na Figura 21 é possível visualizar o método utilizado para medir a área frontal do veículo por software, que consiste em projetar sobre um plano o esboço das extremidades visíveis a partir da observação frontal do carro.

Figura 21 - Área frontal do carro



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 3 contém as principais medidas do projeto, que foram medidas conforme o modelo CAD pela ferramenta de avaliação do software.

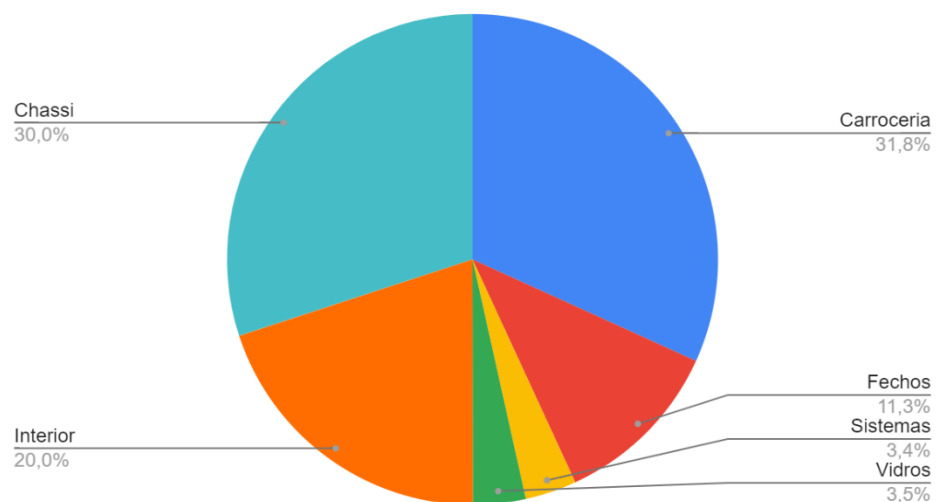
Tabela 3 - Dimensões da carroceria		
Descrição	Valor	Unidade
Comprimento	2830	mm
Largura	1503,6	mm
Altura	1543,2	mm
Entre-eixos	2071,5	mm
Altura máx do solo	243,2	mm
Área frontal	1,844	m ²
Bitola	672	mm

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Além das dimensões da carroceria, é relevante estimar sua massa total. Todavia, o projeto fornecido por Cadorini Neto contém apenas o peso da carroceria externa, em peças que são construídas com ABS. Logo, é válido, utilizando comparações universais, estimar qual é a massa dos outros componentes da carroceria, prevendo valores próprios para uma análise inicial do carro.

De acordo com a Lotus (2010), em um automóvel de passeio convencional, o *body-in-white*, denominação que compreende a estrutura principal de um carro, tem a estratificação de massa dos componentes conforme a Figura 22. Nota-se, então, que a carroceria representa 31,8% do peso total.

Figura 22 - Distribuição de massa de um veículo comum



Fonte: Lotus (2010).

Como a massa da carroceria é conhecida, foi possível calcular a massa dos outros sistemas dentro do *body-in-white*, excluindo-se a massa do chassi, a qual já é conhecida e apresenta-se na seção 5.1.3. Na Tabela 4 observa-se que o peso total é de 233,5 kg, acrescido pelos 67,9 kg dos outros componentes não especificados, mas contabilizados, como elementos de fixação e juntas móveis .

Tabela 4 – Massa do <i>body-in-white</i>	
Item	Valor absoluto [kg]
Carroceria	56,6
Chassi	109
Outros	67,9
Total	233,5

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Porém, observa-se uma particularidade: a massa do chassi não representa, relativamente, a massa que era esperada pela síntese da Lotus. No caso, o chassi representa 46,7% do peso total do *body-in-white*.

5.1.3 Design do chassi metálico

A fim de complementar a caracterização estrutural do veículo compacto, foi elaborado o chassi metálico, o qual serve de base para todos os outros sistemas do carro. Assim, Cadorini Neto (2023b) projetou, com base nas dimensões da carroceria e do chassi do veículo elétrico EV 5010, da montadora Kandi, um chassi tubular, conforme observado na Figura 23.

A Figura 23 apresenta, portanto, uma estrutura denominada *space frame*: um tipo de chassi reconhecido pela alta rigidez torcional e pela sua alta capacidade de suportar esforços mecânicos localizados. No entanto, o principal motivo de sua seleção para o carro elétrico é a maior facilidade de construção, não dependendo de um maquinário de grandes proporções e custos.

Nesse caso, a manufatura pode ser feita em menor escala, necessitando de gabaritos reutilizáveis e de máquinas de soldagem para pequena produção.

Figura 23 - Vista isométrica do chassi veicular



Fonte: Cadorini Neto (2023b).

5.2 EQUACIONAMENTO DINÂMICO DO CARRO

A seleção do motor, durante o devido desenvolvimento do projeto, é feita com base em diversos parâmetros, os quais se extraem das características almejadas no veículo a se construir. Ou seja, ao início dos cálculos insere-se a pré-visualização do modelo automotivo, com dimensões lineares básicas e capacidades de carga.

A especificação do motor elétrico com base em sua potência é definida a partir de parâmetros veiculares como peso em ordem de marcha, peso bruto, distância entre eixos, raio de rolagem da roda, área frontal, eficiência da transmissão e coeficientes de arrasto e de resistência à rolagem (THANGAVEL *et al*, 2023, p. 15, tradução do autor).

A partir de então, nota-se a necessidade de definir tais valores de projeto para, assim, iniciar os cálculos de dimensionamento. Neste tópico foram organizados os valores de diversas variáveis necessárias para especificar o carro, como coeficientes de arrasto e de atrito, dimensões do pneu e constantes físicas.

5.2.1 Pneus

A escolha preliminar dos pneus foi feita conforme os padrões de mercado. No geral, os carros populares, principalmente os menores, utilizam pneus de aro 14”, de modo que a nomenclatura é:

175 / 65 R14 82 T

e pode ser lida conforme as descrições da Tabela 5. Nela, observa-se que a altura da seção, $h_{seção}$, corresponde à equação (5), de modo que o resultado, somado ao aro da roda, resulta o raio total do pneu, importante para os cálculos de transmissão.

$$h_{seção} = \alpha \cdot L \quad (5)$$

Onde α é a proporção das medidas e L é a largura do pneu.

Tabela 5 - Características do pneu	
Pneu	
Proporção	65
Largura da seção	175
Altura da seção	113,75
Aro da roda	14
Raio do pneu	291,55

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Além disso, 82 é o número indicativo da capacidade de carga de cada pneu, que nesse caso é de 475 kg, enquanto T é a letra referente à velocidade máxima, sendo de 190 km/h.

No que se refere ao atrito do pneu com o solo, é possível obter valores convencionais para cada tipo de superfície, sendo que, no geral, os cálculos foram feitos sempre mantendo o veículo no asfalto, que é a condição principal para o caso urbano. A Tabela 6 contém, de forma simplificada, alguns dos mais usuais tipos de solo, sendo que o asfalto é aquele que apresenta o menor coeficiente de atrito entre eles, favorecendo o deslocamento pelo pavimento.

Tabela 6 - Coeficientes de atrito de rolamento

Coeficiente de atrito	
Superfície	μ
Asfalto/concreto	0,025
Terra	0,050
Gramma curta	0,050
Gramma longa	0,100

Fonte: Adaptado de Gomes (2018).

Ademais, a fim de saber o número de rotações do pneu durante o movimento do carro, é preciso estimar o perímetro de sua circunferência externa, conforme a equação (6).

$$C_{pneu} = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (6)$$

Onde C é o comprimento da circunferência do pneu e r é o raio do pneu.

A velocidade angular, calculada em rotações por minuto, é fornecida pela equação (7).

$$n_{pneu} = \left(\frac{V}{3,6 \cdot C_{pneu}} \right) \cdot 60 \quad (7)$$

Onde n é o número de rotações, C é a circunferência do pneu e V é a velocidade do veículo.

5.2.2 Carroceria

Para os cálculos aerodinâmicos do carro, o arrasto é a força mais importante para o dimensionamento de um carro urbano, sem propósito de competir em corridas automotivas que exigem *downforce*.

Nesse caso, a determinação do coeficiente de arrasto geralmente é feita por um túnel de vento, de forma experimental, ou por simulações fluidodinâmicas, de forma numérica. Em ambos os casos, há necessidade de tempo e diferentes recursos, seja um protótipo ou grande poder computacional.

No entanto, considerando a forma comum da carroceria do carro, decidiu-se por determinar o coeficiente C_d por comparação. Na Tabela 7 são apresentados diversos modelos já experimentados e conhecidos, a partir dos quais foi possível estimar o parâmetro aerodinâmico para o veículo deste trabalho.

Tabela 7 - Coeficientes de arrasto de carros comuns

Modelo	Carroceria	Cd
Chevrolet Corsa	Hatch compacto	0,32
Fiat 500	Hatch subcompacto	0,33
Fiat Punto	Hatch compacto	0,3
Ford Fiesta	Hatch compacto	0,33
Honda Fit	Monovolume	0,35
Kia Picanto	Hatch subcompacto	0,34
Nissan Leaf	Hatch médio	0,28

Fonte: Adaptado de Ecomodder (2018).

Assim, tendo o modelo proporções semelhantes aos *hatches* subcompactos, decidiu-se por estabelecer o coeficiente de arrasto como 0,35.

5.2.3 Determinação dos aclives

Os cálculos da força necessária para vencer os aclives foram feitos com base na inclinação percentual em relação ao referencial horizontal. A relação entre a porcentagem e o ângulo, em graus, pode ser vista na Tabela 8, que cobre os valores de 0 a 20, em uma progressão de 5 graus.

Tabela 8 - Aclives		
Inclinação dos aclives		
α [°]	$\text{tg } \alpha$	%
0	0	0,00
5	0,08749	8,75
10	0,17633	17,63
15	0,26795	26,79
20	0,36397	36,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

5.2.4 Dinâmica veicular

A fim de dar embasamento à seleção das baterias e do motor, bem como atestar seu devido funcionamento, esta seção apresenta as equações que foram utilizadas para o dimensionamento do sistema de tração do veículo. Nesse sentido, elas são apresentadas com os símbolos que também são vistos ao longo do trabalho, mantendo o padrão aqui adotado. A

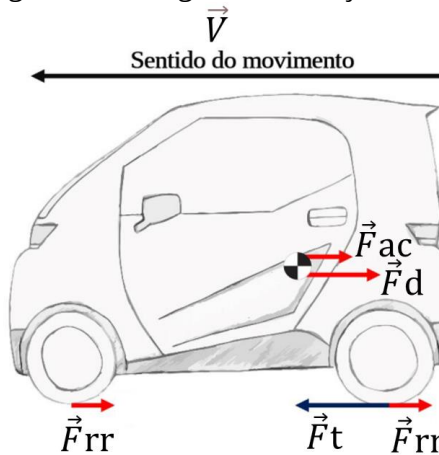
princípio, então, são demonstradas as formas de cada equação e suas variáveis, sendo que as magnitudes são exploradas na metodologia e, os resultados, na seção 6.

As equações apresentadas neste capítulo e nos demais foram extraídas de Halliday (2009) e são configuradas, em sua maioria, como equações comuns apresentadas e estudadas durante o curso de graduação de engenharia mecânica.

5.2.4.1 Forças dinâmicas na pista

Na Figura 24 nota-se uma representação esquemática das principais forças que atuam sobre um carro durante sua movimentação em uma pista sem inclinação. As forças não conservativas são representadas pelo arrasto, F_d , e pela resistência ao rolamento, F_{rr} , ao passo que a força de aceleração, F_{ac} , atua apenas quando a velocidade não é constante. A força trativa, F_t , é a exercida pelo motor.

Figura 24 - Diagrama de forças do carro



Fonte: Adaptado de Colpo (2021).

5.2.4.1.1 Arrasto aerodinâmico

A força de arrasto é diretamente proporcional à velocidade do carro, de acordo com a observação da equação (8). O coeficiente de arrasto, C_d , indica o quanto a geometria perturba o ar durante o escoamento, causando maior força de arrasto aerodinâmico.

$$F_d = \frac{C_d \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A}{2} \quad (8)$$

Onde F_d é a força de arrasto, C_d é o coeficiente de arrasto, ρ é a massa específica do ar, V é a velocidade do carro e A é a área frontal do modelo.

5.2.4.1.2 Resistência ao rolamento

O deslocamento do veículo se dá pelo atrito dos pneus com a pista de rolamento, configuração que permite a transferência de potência para geração de velocidade. No entanto, parte da força é consumida pelo atrito sem contribuição para o deslocamento, a qual é quantificada conforme a equação (9). Segundo ela, a resistência é proporcional ao coeficiente de atrito μ .

$$F_{rr} = m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \mu \quad (9)$$

Onde F_{rr} é a força de resistência, m é a massa do veículo, g é a aceleração da gravidade, α é a inclinação da via e μ é o coeficiente de atrito.

Outrossim, a força de resistência depende também da normal, a qual é caracterizada pelo produto de massa, aceleração da gravidade e $\cos \alpha$, entendendo-se que, maior a inclinação, menor deve ser a força.

5.2.4.1.3 Força de aclave

O peso do carro, quando o deslocamento não acontece em uma superfície horizontal, gera uma componente paralela ao deslocamento, representada pela equação (10). Essa porção do peso age contra a velocidade de deslocamento, sendo considerada uma força relevante para a dinâmica veicular por afetar significativamente o desempenho do carro.

$$F_a = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (10)$$

Onde F_a é a força de aclave, m é a massa do veículo, g é a aceleração da gravidade e α é a inclinação da via.

5.2.4.1.4 Força de aceleração

As forças de aceleração atuam sobre o veículo no momento em que sua velocidade está se alterando. Seu equacionamento, conforme (11), depende basicamente da aceleração e da massa total do carro.

$$F_{ac} = m \cdot a \quad (11)$$

Onde F_{ac} é a força de aceleração, m é a massa do veículo e a é a aceleração do carro.

5.2.4.1.5 Força trativa

No sentido de apoiar o movimento de avanço do veículo, há a força trativa, que deve ser igual à somatória das outras forças, conforme a equação (12).

$$F_t = F_{ac} + F_a + F_{rr} + F_d \quad (12)$$

Onde F_t é a força trativa, F_{ac} é a força de aceleração, F_a é a força de aclone, F_{rr} é a força de resistência ao rolamento e F_d é a força de arrasto.

Entretanto, caso o veículo atinja a velocidade de cruzeiro, a força trativa deve ser igual apenas às forças de arrasto, de rolamento e de aclone, visto não ser necessária mais aceleração. Assim, a equação (13) representa a força para a velocidade constante.

$$F_{tvc} = F_a + F_{rr} + F_d \quad (13)$$

Onde F_{tvc} é a força trativa constante, F_a é a força de aclone, F_{rr} é a força de resistência ao rolamento e F_d é a força de arrasto.

5.2.4.2 Torque

Utilizando a força trativa demonstrada na seção 5.2.4.1.5, é possível determinar o torque entre as rodas e a pista de rolamento, desde que seja previamente estabelecido o tamanho do conjunto roda e pneu. Na equação (14) é possível perceber que o torque é o produto vetorial da força de tração e do raio do pneu.

$$T = r \cdot F_t \quad (14)$$

Onde T é o torque, r é o raio do pneu e F_t é a força trativa.

5.2.4.3 Potência

O produto da força pela velocidade gera a potência mecânica de uma determinada situação dinâmica, conforme a equação (15).

$$P = F_t \cdot V \quad (15)$$

Onde P é a potência, F_t é a força trativa e V é a velocidade do carro.

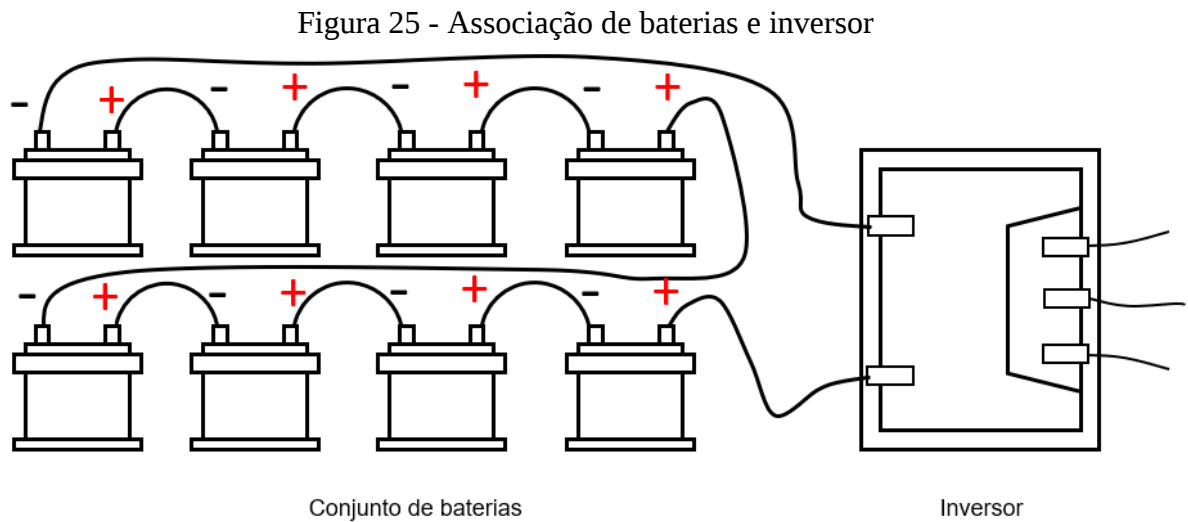
Partindo-se para uma abordagem mais próxima dos catálogos de motores e das convenções de unidades para o mercado automotivo, convém transformar a potência para Cavalo-vapor, conforme (16).

$$P = \frac{F_t \cdot V}{735,5} \quad (16)$$

Onde P é a potência em cavalo-vapor, F_t é a força trativa e V é a velocidade do carro.

5.3 BATERIAS

O sistema de armazenamento de energia do carro é formado por um conjunto de baterias, tal como visto na Figura 25. Notam-se, a princípio, oito baterias ligadas em série, as quais são conectadas ao inversor.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O total de energia armazenada em cada bateria é função da sua diferença de potencial nominal e da sua capacidade de corrente, conforme o apresentado pela equação (17).

$$E_{bateria} = U \cdot I \quad (17)$$

Onde E é a energia da bateria, U é a tensão e I é a corrente elétrica.

Um dos fatores iniciais que podem ser utilizados para avaliar as baterias depende exatamente de sua energia armazenada e da sua massa, nomeadamente a densidade energética, tal qual o exposto pela equação (18).

$$d_{energética} = \frac{E_{bateria}}{m_{bateria}} \quad (18)$$

Onde d_{ene} é a densidade energética, E_{bat} é a energia da bateria e m_{bat} é a massa da bateria.

Ademais, podem ser verificados parâmetros de consumo energético no veículo considerando o banco de baterias e o sistema de *powertrain*. O rendimento por kWh é calculado conforme a equação (19).

$$\eta_{bateria} = \frac{Autonomia}{E_{bateria}} \quad (19)$$

Onde η_{bat} é o rendimento da bateria e E_{bat} é a energia da bateria.

Já a eficiência energética, medida em kWh/km, é o inverso do rendimento por kWh, sendo descrito conforme (20).

$$\eta_{energética} = \frac{1}{\eta_{bateria}} \quad (20)$$

Onde η_{ene} é a eficiência energética e η_{bat} é o rendimento da bateria.

5.3.1 Corrente elétrica

Sendo um dos principais parâmetros para conceber as especificações das baterias e dos cabos do sistema, a corrente elétrica é função da potência elétrica consumida pelo motor e da tensão do banco de baterias. Por conseguinte, é necessário, primeiramente, definir qual é a potência de entrada no motor, da equação (21), que se faz pela razão da demandada pelo deslocamento, conforme a equação (15), sobre o rendimento do motor.

$$P_{elet} = \frac{P}{\eta} \quad (21)$$

Onde P_{ele} é a potência elétrica, P é a potência mecânica e η é o rendimento do motor.

A equação (22), por sua vez, indica a corrente elétrica.

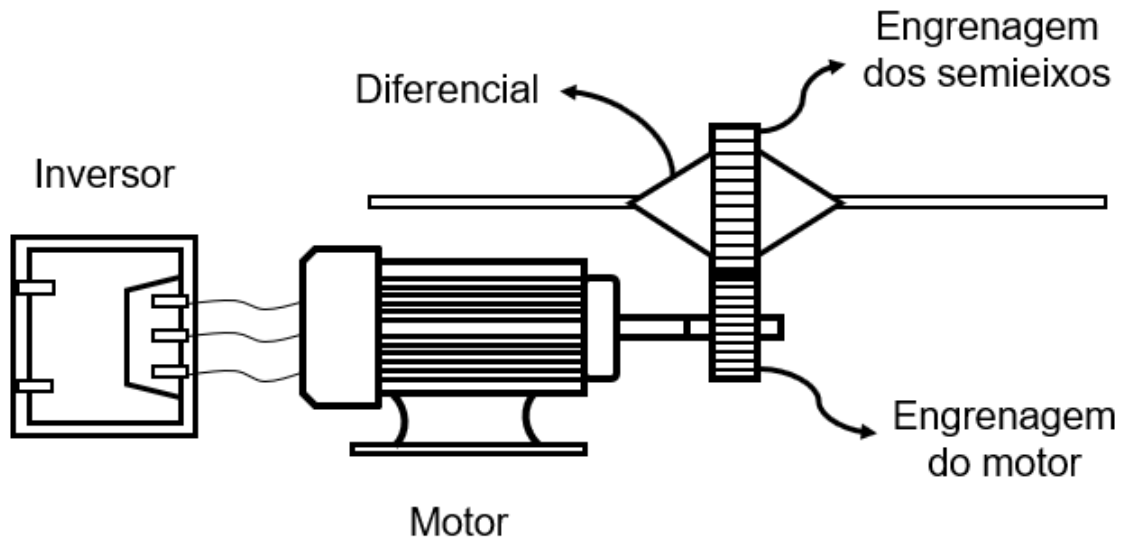
$$i = \frac{P_{elet}}{U} \quad (22)$$

Onde i é a corrente elétrica, P_{ele} é a potência elétrica e U é a tensão.

5.4 MOTOR E TRANSMISSÃO

Na Figura 26 é apresentado o esquema de funcionamento do sistema de transmissão acoplado ao motor elétrico. Assim, a proposta para o veículo deste trabalho é dispensar o uso da caixa de marchas, necessária nos automóveis com MCI, e ligar o motor diretamente aos semieixos do diferencial, como representado pelas engrenagens da figura.

Figura 26 - Desenho esquemático da transmissão



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As engrenagens do motor, dos semieixos e do diferencial são capazes de alterar a frequência angular do motor até as rodas, caracterizando-se um sistema de redução de velocidades. A redução final é quantificada pela equação (23).

$$i = i_{motor} \cdot i_{diferencial} \quad (23)$$

Onde i é a redução total, i_{motor} é a redução do motor e $i_{diferencial}$ é a redução do diferencial.

No caso da redução do diferencial, esse valor é tabelado e fornecido pelo próprio fabricante, sendo que ele depende da razão dos números de dentes das engrenagens do dispositivo. A redução no motor está, na verdade, em função da transmissão de potência entre o eixo do motor e os semieixos, a qual deve ocorrer por engrenagens de tamanhos diferentes.

A fim de se obter valores plausíveis para os diferenciais, foi feita uma pesquisa em catálogos de fabricantes e de fornecedores. A revisão iniciou-se pelo catálogo de eixos e componentes da Spicer (2016), que objetiva fornecer informações de peças e de redução para cada veículo comercial leve atendido.

Não obstante, foram observados o manual do Onix, Chevrolet (2022), e as fichas técnicas do Argo, Fiat (2023), do HB20, Hyundai (2018) e do Polo, Volkswagen (2022).

Estabelecida a redução de velocidades, o sistema de transmissão é responsável pelo número de rotações do pneu conforme as rotações do motor, segundo a equação (24).

$$n_{pneu} = \frac{n_{motor}}{i} \quad (24)$$

Onde n_{pneu} é o número de rotações do pneu, i é a redução total e n_{motor} é o número de rotações do motor.

A velocidade angular do motor, por sua vez, pode ser controlada pelo inversor do sistema. A frequência da corrente fornecida pelo sistema de alimentação é diretamente proporcional às rotações do eixo do motor, as quais também dependem do número de polos do motor. A situação descrita é apresentada pela equação (25).

$$n_{motor} = \frac{f \cdot 120}{z_{polos}} \quad (25)$$

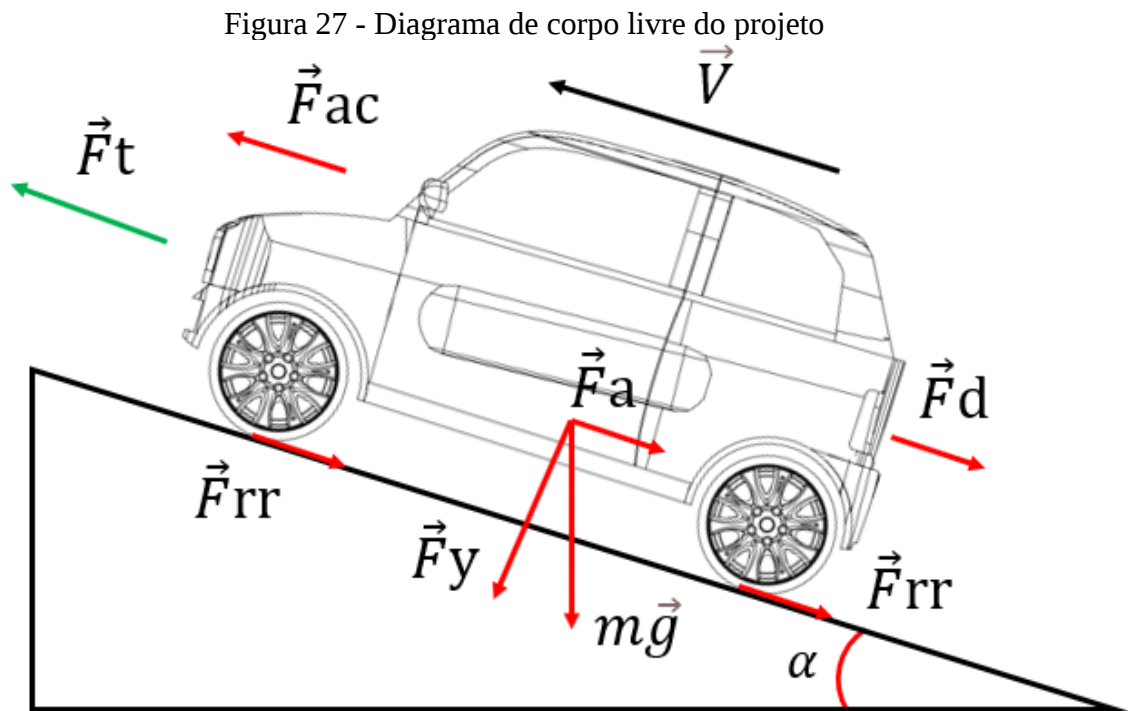
Onde n_{motor} é o número de rotações do motor, f é a frequência da corrente e z_{polos} é o número de polos do motor elétrico.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do equacionamento obtido na seção de revisão da literatura e dadas as características preliminares do veículo no Capítulo Cinco, a presente seção demonstra os cálculos executados para definir as especificações de projeto.

6.1 CÁLCULOS DE DINÂMICA VEICULAR

Na seção 5.2.4.1 foram apresentadas diversas equações que retratam o comportamento de um carro em movimento. De acordo com os materiais apresentados no tópico 5, foram estudados vários casos de movimentação do veículo, abordando as situações mais comuns de um ambiente urbano e outras menos convencionais. Na Figura 27 são vistas as principais forças que foram calculadas neste trabalho para o caso de terreno em aclive.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A massa total do veículo foi, em uma forma preliminar, avaliada conforme a discriminação da Tabela 9, que apresenta de forma sucinta os principais elementos do carro.

Tabela 9 - Massa dos componentes

Item	Descrição	Quantidade [un]	Massa unitária [kg]	Massa total [kg]
1	Carroceria	1	56,6	56,6
2	Fechos	1	67,9	67,9
3	Chassi	1	109	109
4	Roda	4	13,3	53,3
5	Motor	1	59	59
6	Bateria	10	36,7	367
7	Inversor	1	8	8
8	Passageiro	2	80	160
9	Carga	1	60	60
Massa total				941,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Quanto aos parâmetros cinemáticos, a aceleração foi arbitrada e pode ser vista na Tabela 10. Foi estimado o tempo de 14 segundos para atingir a velocidade de 100 km/h, valor relativamente comum para os carros compactos atualmente.

Tabela 10 - Determinação da aceleração

Aceleração linear	
v0 [m/s]	0,0
v [m/s]	27,78
t [s]	14,0
a [m/s ²]	1,98

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Desse modo, as tabelas de 11 a 15 demonstram os resultados dos cálculos das forças atuantes sobre o carro, segundo as equações (8), (9), (10), (11) e (12). Observa-se que as tabelas estão dispostas em sucessão de inclinação da pista de rolamento, iniciando-se em 0° na Tabela 11 até chegar a 20° no caso da Tabela 15.

Tabela 11 - Forças de condução em via horizontal

Forças	Velocidade [km/h]				
	10	30	50	70	100
Fd [N]	2,9	26,0	72,3	141,7	289,2
Frr [N]	230,9	230,9	230,9	230,9	230,9
Fa [N]	0	0	0	0	0
Fac [N]	1867,8	1867,8	1867,8	1867,8	1867,8
Ft [N]	2101,6	2124,7	2171,0	2240,4	2387,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 12 - Forças de condução em aclave de 5°

Forças	Velocidade [km/h]				
	10	30	50	70	100
Fd [N]	2,9	26,0	72,3	141,7	289,2
Frr [N]	230,0	230,0	230,0	230,0	230,0
Fa [N]	804,8	804,8	804,8	804,8	804,8
Fac [N]	1867,8	1867,8	1867,8	1867,8	1867,8
Ft [N]	2905,5	2928,7	2975,0	3044,4	3191,8

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 13 - Forças de condução em aclave de 10°

Forças	Velocidade [km/h]				
	10	30	50	70	100
Fd [N]	2,9	26,0	72,3	141,7	289,2
Frr [N]	227,4	227,4	227,4	227,4	227,4
Fa [N]	1603,5	1603,5	1603,5	1603,5	1603,5
Fac [N]	1867,8	1867,8	1867,8	1867,8	1867,8
Ft [N]	3701,6	3724,8	3771,0	3840,4	3987,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 14 - Forças de condução em aclave de 15°

Forças	Velocidade [km/h]				
	10	30	50	70	100
Fd [N]	2,9	26,0	72,3	141,7	289,2
Frr [N]	223,0	223,0	223,0	223,0	223,0
Fa [N]	2390,0	2390,0	2390,0	2390,0	2390,0
Fac [N]	1867,8	1867,8	1867,8	1867,8	1867,8
Ft [N]	4483,8	4506,9	4553,2	4622,6	4770,1

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 15 - Forças de condução em aclave de 20°

Forças	Velocidade [km/h]				
	10	30	50	70	100
Fd [N]	2,9	26,0	72,3	141,7	289,2
Frr [N]	216,9	216,9	216,9	216,9	216,9
Fa [N]	3158,3	3158,3	3158,3	3158,3	3158,3
Fac [N]	1867,8	1867,8	1867,8	1867,8	1867,8
Ft [N]	5246,0	5269,1	5315,4	5384,8	5532,3

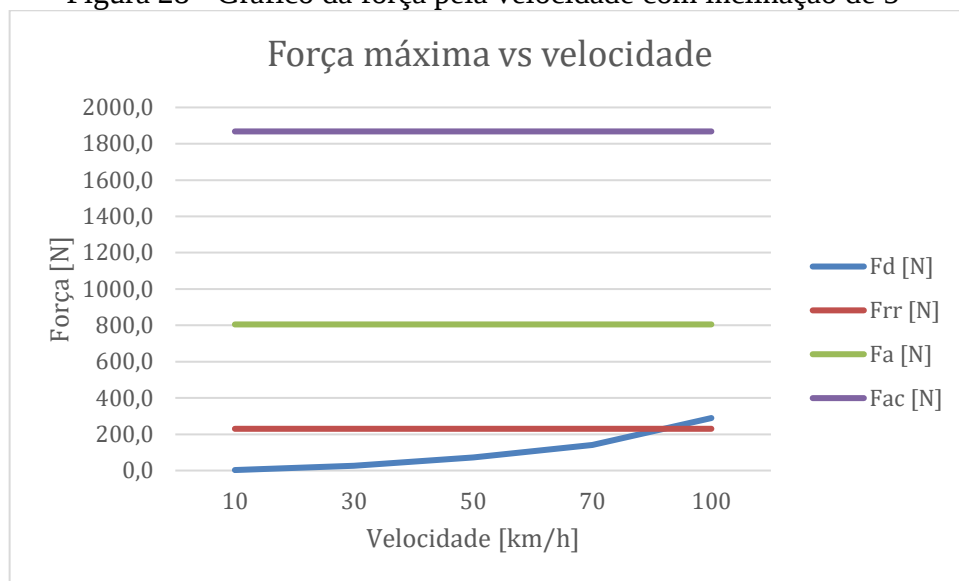
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A fim de explicitar os valores das tabelas, foram feitos gráficos que resumem o comportamento das forças de acordo com a velocidade e a inclinação.

O gráfico da Figura 28 representa o comportamento individualizado de cada uma das quatro forças da dinâmica veicular em função da velocidade. Estabeleceu-se uma inclinação de 8,75% como fixa para os dados e considerou-se que a velocidade máxima é de 100 km/h.

A princípio, notam-se as forças de aclone (F_a) e de aceleração (F_{ac}) constantes e de ordem maior que as restantes. A força de arrasto é a única crescente, de modo que ao final da análise ela se torna maior que a resistência ao rolamento, sendo que esta diminui ligeiramente com o aumento da velocidade.

Figura 28 - Gráfico da força pela velocidade com inclinação de 5°



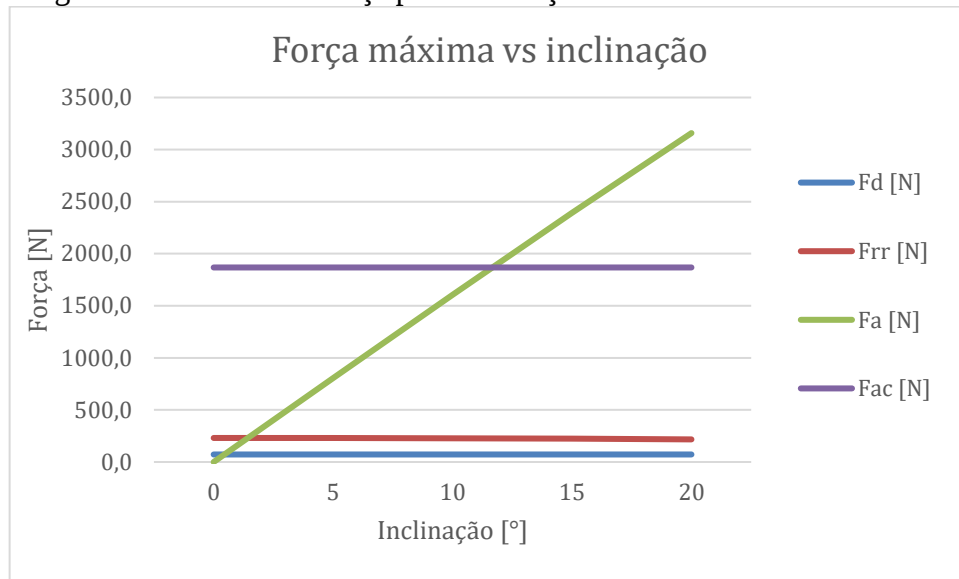
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Figura 29 é possível ver como as forças variam conforme a inclinação da via, mantendo-se a velocidade constante, arbitrada em 50 km/h. Nessa situação, apenas duas forças alteram-se conforme a inclinação muda: a resistência ao rolamento e a força de aclone.

Logo, se elevada a inclinação, maior tende a ser a força para compensar a componente paralela do peso, que a partir de um momento se torna a maior magnitude entre as forças.

A força de resistência ao rolamento, por outro lado, depende da componente normal do peso, o qual diminui conforme maiores inclinações. Consequentemente, se a inclinação é elevada, o atrito é menor.

Figura 29 - Gráfico da força pela inclinação com velocidade de 50 km/h



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Conforme as tabelas de 11 a 15 e segundo a equação (14), foi possível determinar o torque máximo solicitado em cada caso de deslocamento. A Tabela 16 apresenta os resultados, de modo que é possível notar o impacto significativos da angulação da pista nos resultados.

Tabela 16 - Torque em função da velocidade e da inclinação

Active [°]	Torque máximo [N.m]				
	Velocidade [km/h]				
	10	30	50	70	100
0	612,7	619,5	633,0	653,2	696,2
5	847,1	853,9	867,3	887,6	930,6
10	1079,2	1086,0	1099,4	1119,7	1162,7
15	1307,2	1314,0	1327,5	1347,7	1390,7
20	1529,5	1536,2	1549,7	1569,9	1612,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A potência solicitada pelo movimento é resultado da equação (15), e depende da força trativa em cada situação, a qual foi fornecida pela equação (12). Portanto, a Tabela 17 reúne os valores máximos de potência que foram previstos no projeto. Nota-se que algumas situações são incomuns, como os casos de velocidades de 70 e 100 km/h em aclives de 20°. Apesar de calculadas, tais situações não ocorrem na prática, mas foram interessantes para evidenciar até quanta potência pode ser exigida. De forma semelhante, a Tabela 18 apresenta os mesmos valores, porém convertidos para a unidade CV.

Tabela 17 - Potência em função da velocidade e da inclinação

Acline [°]	Potência máxima [W]				
	Velocidade [km/h]				
	10	30	50	70	100
0	3243,5	9923,4	17181,7	25403,8	40388,0
5	5476,7	16623,0	28347,6	41036,2	62719,9
10	7688,0	23256,9	39404,2	56515,4	84833,0
15	9860,6	29774,7	50267,2	71723,6	106559,1
20	11978,0	36126,8	60854,0	86545,2	127732,7

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

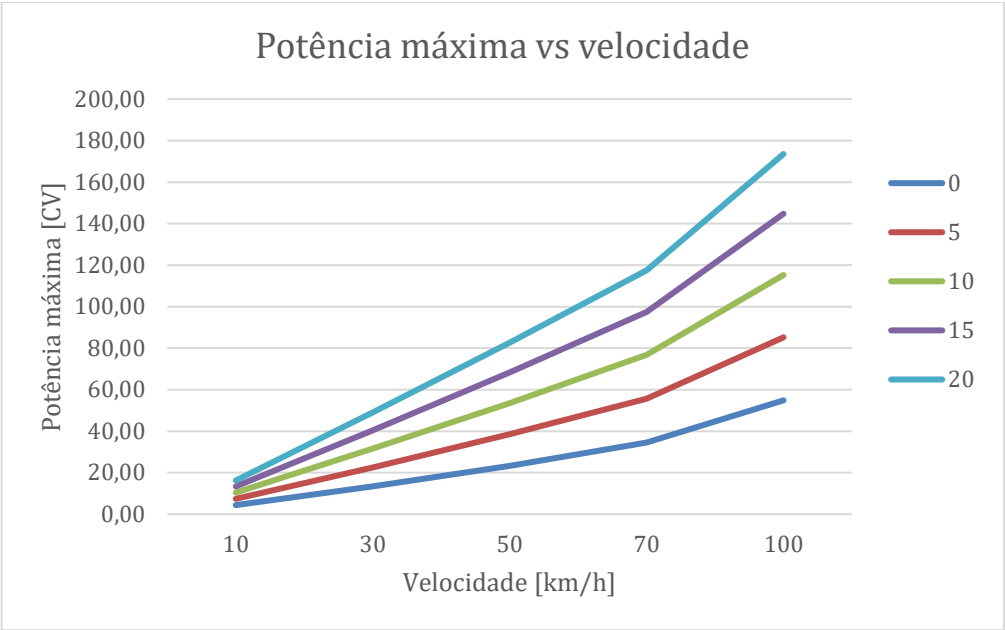
Tabela 18 - Potência convertida para cavalo-vapor

Acline [°]	Potência máxima [CV]				
	Velocidade [km/h]				
	10	30	50	70	100
0	4,41	13,48	23,34	34,52	54,87
5	7,44	22,59	38,52	55,76	85,22
10	10,45	31,60	53,54	76,79	115,26
15	13,40	40,45	68,30	97,45	144,78
20	16,27	49,09	82,68	117,59	173,55

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com a finalidade de discernir melhor como a potência solicitada se comporta em função das duas variáveis, o gráfico da Figura 30 foi plotado. As curvas representam as inclinações da pista e é notável que a potência é diretamente proporcional à velocidade, sendo que, quando esta é elevada, a demanda daquela aumenta muito. Por exemplo, comparando-se as velocidades de 50 e 100 km/h, a potência requerida chega perto de triplicar na velocidade maior, indicando o impacto relevante do acréscimo de velocidade.

Figura 30 - Gráfico da potência pela velocidade em cada inclinação



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

No entanto, se ausente a força de aceleração, as forças restantes devem ser equilibradas apenas para manter a velocidade constante. Conforme o exposto na equação (13), a Tabela 19 apresenta as exigências de potência do motor para tal situação, as quais são significativamente menores que as da Tabela 18.

Tabela 19 - Solicitação mínima de potência

Active [°]	Potência à velocidade constante [CV]				
	Velocidade [km/h]				
	10	30	50	70	100
0	0,88	2,91	5,72	9,85	19,64
5	3,92	12,02	20,91	31,10	50,00
10	6,93	21,04	35,94	52,15	80,07
15	9,88	29,90	50,71	72,83	109,61
20	12,76	38,54	65,10	92,98	138,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

6.2 CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO DAS BATERIAS

O sistema de armazenamento de energia do veículo foi equacionado com base nas solicitações de potência oriundas da dinâmica veicular. Decidiu-se elaborar uma média ponderada para diferenciar o tempo em que o carro se desloca em situações críticas e aquele em que sua velocidade é constante.

A equação (26) representa como foi calculada, então, a potência ponderada: 10% do tráfego se dá na potência máxima e 90% na potência mínima. As potências usadas nessa equação consideram o rendimento do motor e foram calculadas a partir da equação (21).

$$Pot_{padrão} = (0,10 \times Pot_{elet\ máx}) + (0,90 \times Pot_{elet\ vc}) \quad (26)$$

Onde Pot_{pad} é a potência elétrica de referência, $Pot_{eletmáx}$ é a potência elétrica em situações críticas e Pot_{eletvc} é a potência elétrica quando a velocidade é constante.

Na Tabela 20 são apresentadas as correntes elétricas calculadas conforme a tensão do banco de baterias e a potência solicitada pelo motor. A princípio, é interessante notar como a maior oferta de tensão implica correntes menores, o que altera o dimensionamento dos cabos de ligação com o motor e o inversor.

Tabela 20 - Corrente do banco de baterias

Velocidade [km/h] /Aclive [°]	Potência elétrica [W]	Corrente [A]			
		Tensão [V]			
		48	72	96	120
10/20	10713,77	223,2	148,8	111,6	89,3
30/15	25298,09	527,0	351,4	263,5	210,8
50/10	30808,26	641,8	427,9	320,9	256,7
70/5	27433,01	571,5	381,0	285,8	228,6
100/0	18930,17	394,4	262,9	197,2	157,8

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com base nas correntes calculadas para cada situação foi determinada a área dos fios do banco de baterias, de acordo com o proposto por Souza (2013). Na Tabela 21 são mostrados os fios e suas respectivas áreas, de modo que é notável que as maiores tensões permitem dimensionar fios menores.

Tabela 21 - Área do fio de conexão

Velocidade [km/h] /Aclive [°]	Potência elétrica [W]	Área do fio [mm²]			
		Tensão [V]			
		48	72	96	120
10/20	10713,77	120	70	35	25
30/15	25298,09	500	240	150	120
50/10	30808,26	500	400	240	150
70/5	27433,01	500	300	185	120
100/0	18930,17	300	150	95	70

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A partir das correntes observadas na Tabela 21 foram calculados os diâmetros dos fios, sendo que os resultados estão na Tabela 22. Com tais resultados foi possível ter uma estimativa de como a seleção das baterias impacta o dimensionamento dos cabos elétricos do *powertrain*.

Tabela 22 - Diâmetro do fio [mm]

Velocidade [km/h] /Active [°]	Potência elétrica [W]	Diâmetro do fio [mm]			
		Tensão [V]			
		48	72	96	120
10/20	10713,77	12,36	9,44	6,68	5,64
30/15	25298,09	25,23	17,48	13,82	12,36
50/10	30808,26	25,23	22,57	17,48	13,82
70/5	27433,01	25,23	19,54	15,35	12,36
100/0	18930,17	19,54	13,82	11,00	9,44

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Conforme os valores de corrente, decidiu-se por adotar um sistema de maior tensão nominal, objetivando a diminuição das correntes de operação do sistema de *powertrain*. A Tabela 24 apresenta alguns parâmetros calculados para um conjunto de 10 baterias.

As especificações das baterias foram organizadas na Tabela 23, de modo que, para cada uma das opções, foram calculadas a autonomia e o rendimento energético, este conforme a equação (18).

Tabela 23 - Opções de baterias

Baterias tracionárias de chumbo				
Modelo	12ML40	MTX225	TT28GGC	
Fabricante	Moura	Moura	Tudor	
Tensão [V]	12	6	8	
C20 [Ah]	150	225	165	
Massa [kg]	36,7	30	29,3	
Densidade energética [kW/kg]	0,0490	0,0450	0,0451	

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Desse modo, foi selecionada a bateria Moura 12ML40 para a demonstração dos resultados, visto que ela apresentou bons resultados de autonomia para um conjunto de 120 V. A Tabela 24 contém os cálculos de autonomia para uma velocidade de 50 km/h na ausência de active e com velocidade constante.

As linhas de potência elétrica de 90% e de 10% são os componentes da equação (26) calculadas por (21), de modo que a porcentagem indica a porção de tempo em cada exigência de potência e o resultado final é indicado por E.

A razão da capacidade total de energia, E_{bateria} , e pelo consumo horário, E , implica o tempo de uso do motor na velocidade de 50 km/h. No entanto, a fim de conservar a vida útil das baterias, decidiu-se por limitar o uso para 90% de sua energia armazenada, reservando 10% para não causar estresse no sistema. O resultado final da autonomia é, para este caso, de 114 km, representado pelo produto do tempo pela velocidade.

Tabela 24 - Estimativa de autonomia para 18 kWh de bateria

Consumo de energia	
Potência elétrica (90%) [W]	4678,32
Potência elétrica (10%) [W]	25823,46
E [Wh]	6792,83
E_{bateria} [Wh]	18000
Tempo (90%) [h]	2,385
Autonomia [km]	114,47

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 25, por sua vez, apresenta alguns indicadores de consumo do veículo. O rendimento apresentado foi calculado com a equação (19) e os outros três parâmetros são derivados de (20): o consumo é multiplicado por 100 e a eficiência em joules, por 3,6.

O rendimento por kWh é interessante para avaliar quanto o carro pode percorrer por cada unidade de energia armazenada, sendo que o valor de 6,36 é comum para veículos elétricos desse porte.

Tabela 25 - Avaliação do consumo de energia elétrica

Parâmetros de consumo	
Rendimento por kWh [km/kWh]	6,36
Consumo [kWh/100 km]	15,72
Eficiência energética [kWh/km]	0,157
Eficiência energética [MJ/km]	0,566

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

6.3 CÁLCULOS DE MOTOR E TRANSMISSÃO

Nesta seção foi avaliada a relação de transmissão necessária para que o veículo atingisse velocidades específicas, arbitradas conforme a utilização no cenário urbano. Foi adotada uma velocidade linear de, no máximo, 100 km/h nos cálculos realizados para dimensionamento do

motor, considerando esta a velocidade máxima para o projeto. A Tabela 26 contém as equivalências entre a velocidade de deslocamento e a velocidade angular do pneu, utilizadas como parâmetro para dimensionar a transmissão.

O comprimento do pneu, 0,583 m, foi calculado pela equação (6) a partir do valor do raio da Tabela 5. O número de rotações por minuto, por sua vez, foi obtido pela equação (7).

Tabela 26 - Relação de velocidade linear e rotações

Velocidade linear [km/h]	Rotações [rpm]
5	45,49
10	90,98
20	181,96
30	272,95
40	363,93
50	454,91
60	545,89
80	727,86
100	909,82

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As rotações do pneu são proporcionais às rotações do motor pela relação de transmissão do conjunto de *powertrain*. No caso dos motores elétricos, a velocidade angular varia segundo o número de polos do motor. Na Tabela 27, as rotações nominais dos motores estão indicadas: 3600 para 2 polos e 1800 para 4 polos.

Desse modo, de acordo com a equação (24) foi possível calcular a redução necessária como um todo, comparando as velocidades angulares e lineares. Nota-se, portanto, que o motor com 4 polos necessita de uma menor razão de redução dada a sua frequência angular naturalmente menor.

Tabela 27 - Redução de rotações segundo polaridade do motor

Velocidade linear [km/h]	Rotações do pneu [rpm]	Motor	
		2 polos 3600	4 polos 1800
5	45,49	79,1:1	39,6:1
10	90,98	39,6:1	19,8:1
20	181,96	19,8:1	9,9:1
30	272,95	13,2:1	6,6:1
40	363,93	9,9:1	4,9:1
50	454,91	7,9:1	4:1
60	545,89	6,6:1	3,3:1
80	727,86	4,9:1	2,5:1
100	909,82	4:1	2:1

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As relações de transmissão, indicadas na seção 5.4 pela equação (23), são demonstradas na Tabela 28 e foram arbitradas a fim de manter os valores de frequência dentro do limite convencional dos inversores, cerca de 300 Hz.

A relação do diferencial é baseada em uma média de valores convencionais de mercado para diferenciais automotivos, de modo que foi definida a redução de 3,5:1. A redução do arranjo de transmissão do motor foi estabelecida para 1,5:1.

Tabela 28 - Redução de velocidades da transmissão

Componente	Relação
Diferencial	3,5
Engrenagens do motor	1,5
Total	5,25

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Então, com base na equação (25), foi possível criar a Tabela 29, indicando qual frequência o inversor deve fornecer para cada velocidade de deslocamento. É possível observar que as frequências maiores são destinadas às velocidades elevadas, de modo que, à 100 km/h, a frequência deve ser por volta de 160 Hz, ainda dentro do limite estabelecido.

Tabela 29 - Relação entre frequência do inversor e velocidade

Velocidade linear [km/h]	Rotações da roda [rpm]	Rotações do motor [rpm]	Frequência [Hz]
5	45,49	238,83	7,96
10	90,98	477,66	15,92
20	181,96	955,31	31,84
30	272,95	1432,97	47,77
40	363,93	1910,62	63,69
50	454,91	2388,28	79,61
60	545,89	2865,94	95,53
80	727,86	3821,25	127,37
100	909,82	4776,56	159,22

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na Tabela 30 são apresentados alguns dos motores elétricos disponíveis no mercado especificamente para tração elétrica. Eles apresentam potências nominais distintas e tamanhos ligeiramente diferentes.

Tabela 30 - Comparativo de motores elétricos do mercado

Motores elétricos			
Modelo	WTE300	ME132 4P 25CV	Motor EV132L4
Fabricante	WEG	Hércules	Mercosul
Potência nominal [kW]	11,8	18,5	22
Velocidade nominal [rpm]	1760	2650	2650
Torque nominal [N.m]	65,1	66	-
Potência máxima [kW]	23	55	-
Torque máximo [N.m]	130	200	-
Velocidade máxima [rpm]	6000	-	-
Corrente [A]	189	160	185
Tensão [Vdc]	72	102	96
Rendimento [%]	89,5	91	91

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A fim de selecionar o motor ideal para este projeto, decidiu-se por comparar a potência máxima demandada e a potência elétrica máxima do motor. Para tanto, foram utilizadas a equação (21) e a Tabela 17, definindo um rendimento geral dos motores de 90%. A Tabela 31 apresenta o comparativo entre os motores WEG e Hércules, ou seja, aqueles que fornecem os valores de potência máxima do motor. A cor mais escura indica que o motor WTE300 é capaz de suprir a demanda, bem como o ME132 4P 25CV, ao passo que a cor mais clara demonstra que apenas o segundo é suficiente.

Assim, nota-se que, para casos de velocidades maiores, como 70 km/h, apenas o motor Hércules suporta as demandas de potência. As inclinações, quando as velocidades também forem altas, devem ser as mínimas possíveis, de modo que o motor apenas suporta a velocidade de 100 km/h para cerca de 0° de inclinação da pista de rolamento. Para inclinações elevadas, no entanto, ambos os motores são adequados, dada a condição de se manter em baixa velocidade.

Tabela 31 - Disponibilidade de potência dos motores

Aclive [°]	Potência elétrica máxima [W]				
	Velocidade [km/h]				
	10	30	50	70	100
0	3604	11026	19091	28226	44876
5	6085	18470	31497	45596	69689
10	8542	25841	43782	62795	94259
15	10956	33083	55852	79693	118399
20	13309	40141	67616	96161	141925

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A fim de controlar a rotação do motor selecionado, na Tabela 32 são apresentados dois modelos de inversores que podem ser utilizados no veículo. Nesse caso, o modelo da WEG apresenta corrente nominal consideravelmente maior, sendo mais interessante para as demandas calculadas.

Tabela 32 - Comparativo de inversores para tração		
Inversores de frequência		
Modelo	CVW500	1239E - 85
Fabricante	WEG	Curtis
Tensão nominal de entrada (potência) [Vcc]	130 - 400	72-144
Limites de tensão de entrada (potência) [Vcc]	100 - 430	50-170
Tensão nominal de entrada (controle) [Vcc]	12-24	12
Corrente nominal [A]	275	135
Corrente de saída de pico [A]	550	500
Tensão de saída [Vca]	$V_{cc}/\sqrt{2}$	$V_{cc}/\sqrt{2}$

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

6.4 CASO DA BATERIA DE LÍTIO-FERRO-FOSFATO

Os resultados demonstrados nas seções 6.1 e 6.2 foram feitos, inicialmente, para o caso de um conjunto de baterias de chumbo. Como apresentado no tópico 4.5, esse tipo de ESS contém baixa densidade energética, de modo que o maior acúmulo de energia resulta a adição considerável de massa ao carro. No entanto, há a possibilidade de utilização de baterias com base no lítio.

Como o apresentado na revisão da literatura, as baterias feitas com esse metal alcalino geralmente são mais leves. No caso da substituição das baterias inicialmente planejadas para o carro por baterias de lítio, mais modernas, os resultados indicam que a autonomia pode ser a mesma, mas com menor capacidade de energia.

A Tabela 33 apresenta a massa total do veículo com o banco de baterias atualizado. A sua redução em 30,5%, comparativamente ao primeiro caso, afeta toda a dinâmica veicular, a começar pelas equações (9), (10) e (11), as quais são diretamente proporcionais à massa.

Tabela 33 – Massa do veículo com bateria de lítio

Item	Descrição	Quantidade [un]	Massa unitária [kg]	Massa total [kg]
1	Carroceria	1	56,6	56,6
2	Fechos	1	67,9	67,9
3	Chassi	1	109	109
4	Roda	4	13,3	53,3
5	Motor	1	59	59
6	Bateria	40	2	80
7	Inversor	1	8	8
8	Passageiro	2	80	160
9	Carga	1	60	60
Massa total				654,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A potência demandada, então, tende a diminuir, conforme o visto na Tabela 34. A princípio, as reduções calculadas são da ordem de 30%, o que aumenta o rendimento por kWh e permite autonomies mais elevadas mesmo para baterias com menor capacidade.

Tabela 34 – Potência mínima com bateria de lítio

Potência à velocidade constante [CV]					
Aclive [°]	Velocidade [km/h]				
	10	30	50	70	100
0	0,62	2,11	4,40	7,99	16,98
5	2,73	8,44	14,95	22,76	38,09
10	4,82	14,71	25,40	37,39	58,99
15	6,87	20,87	35,66	51,76	79,52
20	8,87	26,88	45,67	65,77	99,53

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Tabela 35 reitera o menor consumo de energia, permitindo uma autonomia de aproximadamente 115 km, nas mesmas situações da Tabela 24, porém partindo do total de 13,4 kWh de energia do banco de baterias.

Tabela 35 – Avaliação do consumo para bateria de lítio

Consumo de energia	
Potência elétrica (90%) [W]	3592,10
Potência elétrica (10%) [W]	18023,55
E [Wh]	5035,25
Ebateria [Wh]	13440
Tempo (90%) [h]	2,402
Autonomia [km]	115,31

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Concomitantemente, a redução de massa alivia o sistema de tração elétrica, favorecendo os motores e permitindo maiores velocidades e inclinações. Nota-se, na Tabela 36, que o motor Hércules alcança 100 km/h com até 5° de inclinação, sendo que o motor menos potente consegue atingir, com essas baterias, até 70 km/h.

Tabela 36 – Disponibilidade de potência no caso do lítio					
Active [°]	Potência elétrica máxima [W]				
	Velocidade [km/h]				
	10	30	50	70	100
0	2508	7738	13610	20554	33915
5	4233	12912	22234	32627	51163
10	5941	18036	30774	44583	68242
15	7619	23070	39164	56329	85021
20	9254	27976	47340	67776	101375

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

6.5 ESPECIFICAÇÕES E CENÁRIOS

A fim de agregar os resultados da pesquisa, foram criados cenários de utilização, os quais insinuam diferentes especificações do veículo. Comparando-se as baterias de chumbo com as de LiFePO4, notou-se que estas apresentam grande vantagem com relação a aquelas, de modo que em todas as especificações decidiu-se por empregar os sistemas com lítio.

O primeiro caso proposto, então, é aquele em que o motorista deve trafegar entre cidades próximas, como no trajeto para o trabalho. A Tabela 37 indica os componentes das baterias e do *powertrain*. A velocidade máxima é de 100km/h e, a autonomia, de 115 km.

Tabela 37 – Especificações para uso intermunicipal			
Item	Descrição	Fabricante	Quantidade
Motor	ME132 4P 25CV	Hércules	1
Inversor	CVW500	WEG	1
Bateria	3,2V 105Ah	LiitoKala	40

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O segundo caso que foi proposto é o de utilização urbana, sempre dentro da mesma cidade. Nesse caso, conforme a seção 4.7, as demandas são de cerca de 13,3 km por trajeto, de modo que a autonomia pode ser menor, bem como o motor pode ser menos potente. A Tabela

38 apresenta, assim, os componentes, de modo que as baterias são as mesmas, porém em menor quantidade.

Nessa situação, a velocidade máxima é de 70 km/h e a autonomia, de 72 km.

Tabela 38 – Especificações para uso intramunicipal

Item	Descrição	Fabricante	Quantidade
Motor	WTE300	WEG	1
Inversor	CVW500	WEG	1
Bateria	3,2V 105Ah	LiitoKala	24

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

7 CONCLUSÕES

O projeto do carro elétrico urbano apresentou, ao longo da execução, variações de especificações principalmente devido ao sistema de armazenamento de energia. O conceito preliminar, ao incluir baterias de chumbo, criou demandas elevadas de potência. A inserção dos sistemas de lítio proveu alívio ao *powertrain* e permitiu o projeto de um veículo mais leve e eficiente. Nesse caso, foi observada uma redução de aproximadamente 280 kg na massa total, o que levou à diminuição da capacidade das baterias e manteve, no entanto, a autonomia, elevando o rendimento por kWh.

Nesse caso, quanto à autonomia, viu-se que os trajetos mais comuns realizados em cidades com população superior a 100 mil habitantes são em média de, no máximo, 13 km. Considerando o deslocamento completo, que envolve a ida e a volta para o ponto de partida, a autonomia mínima do carro, sem considerar possíveis recargas em paradas no trajeto, é de 26 km. Os dois cenários estudados, portanto, são capazes de fornecer, com coeficientes de segurança de 4,4 e 2,7, respectivamente, a autonomia média necessária.

Quanto às forças envolvidas no deslocamento, notou-se que a força de aceleração é, na maioria das vezes, a mais substancial e que, portanto, mais demanda potência do motor. Quando o veículo trafega em velocidade constante, no entanto, a força principal tende a ser a de aclives. Limitando-se a inclinação de tráfego a 3°, porém, a força de arrasto torna-se o maior componente da força trativa.

O modelo principal proposto, aquele capaz de viagens curtas, foi especificado com motor elétrico de indução com corrente alternada, do tipo trifásico. A fabricante dele é a Hércules, nacional, e o modelo é o ME132 4P 25CV, sendo o seu inversor o WEG CVW500, que atende as necessidades de corrente e tensão desse motor. Já o banco de baterias é formado por 40 células de LiFePO₄, de 3,2V e 105 Ah de corrente nominal.

Ademais, o carro tem a carroceria do tipo *hatch* e deve percorrer vias com inclinações de até 20° ou 36%, sendo que as mais comuns, conforme a seção 4.7.1, são menores do que esse limite, tanto nas rodovias quanto nas zonas urbanas. Ainda assim, os trajetos que o carro pode percorrer devem chegar a até 115 km com uma carga cheia.

Além disso, conforme os cenários criados, as especificações do veículo podem mudar para atender, atenuando o superdimensionamento, às exigências de cada caso. Para o uso estritamente urbano, negando rodovias ou velocidades superiores a 70 km/h, é possível retirar 16 células do banco de baterias, reduzindo os recursos de bateria em, aproximadamente, 40%.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Os resultados deste trabalho definiram os componentes que podem ser utilizados, de maneira suficiente para os casos convencionais, em um carro elétrico compacto. Todavia, para além dos cálculos do projeto, há a possibilidade de estender o trabalho pelo emprego dos itens dimensionados na construção efetiva do veículo.

Portanto, a continuidade deste trabalho pode ser feita almejando-se fabricar o carro e compreendendo todos os aspectos envolvidos, a começar pela especificação de outros componentes que não foram dimensionados neste desenvolvimento, mas que são imprescindíveis para o automóvel. Neste caso, é possível citar os sistemas de freio, suspensão, acionamentos e de segurança, os quais devem compor um carro convencional e preparado para ser utilizado em vias públicas.

Por conseguinte, pode-se planejar, com todas as especificações reunidas, a fabricação de uma unidade do veículo. Tal processo pode ser complementado pela análise de custos e pela projeção da viabilidade de produção em série do veículo.

REFERÊNCIAS

- ALCOFORADO, F. **As grandes invenções no transporte terrestre e dutoviário da história e sua futura evolução**. [Salvador], 5 fev. 2022. LinkedIn: Fernando Alcoforado. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/grandes-invenções-transporte-terrestre-e-dutoviário-da-alcoforado>. Acesso em: 21 set. 2024.
- ARENGUES, I. R. *et al.* Veículos elétricos: um estudo descritivo de seus impactos ambientais. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 11, n. 11, 2022. ISSN 2525-3409.
- ALBRECHTOWICZ, P. Electric vehicle impact on the environment in terms of the electric energy source — case study. **Energy Reports**, Amsterdam, v. 9, 2023. ISSN 2352-4847.
- BARBER, H. L. Mechanical evolution of the automobile. *In: ____*. **Story of the automobile: Its history and development from 1760 to 1917**. Salt Lake: Project Gutenberg, 2021, p. 49-76.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Programa mobilidade verde e inovação** – Programa Mover. Brasília: MDIC, 2023.4 p.
- BUTLER, L.; YIGITCANLAR, T.; PAZ, A. Smart urban mobility innovations: a comprehensive review and evaluation. **IEEE Access**, New York, v. 8, 2020. ISSN 2169-3536
- BMW. **Urban mobility**: discover 5 trends of the future. [Farnborough], 15 ago. 2019. Disponível em: <https://www.bmw.com/en/innovation/5-trends-of-urban-mobility.html/1000>. Acesso em: 19 out. 2024.
- CATÁLOGO de reposição – Eixos e componentes: veículos leves. [Maumee, Ohio], 2016 SPICER. Disponível em: https://spicer.com.br/downloads/spicer_diferenciais.pdf. Acesso em: 02 nov. 2024.
- COMO calcular a inclinação de uma subida? ALKÈ, [Padova, 2017]. Disponível em: <https://www.alke.pt/calcular-inclinacao-subida-veiculos-eletricos>. Acesso em: 19 set. 2024.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Pesquisa: Mobilidade da população urbana**. CNT, Brasília, 96 p., 2017.
- COLPO, L. R. **Projeto conceitual de um veículo elétrico de pequeno porte para o transporte urbano individual**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.
- ECOMODDER. **Vehicle coefficient of drag list**. [s.l.], 9 jul. 2018. Disponível em: https://ecomodder.com/wiki/Vehicle_Coefficient_of_Drag_List. Acesso em: 20 out. 2024.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA: **Relatório síntese do balanço energético nacional**: ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024.
- FEDERAÇÃO NACIONAL DA DISTRIBUIÇÃO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. **Relatório anual 2023 do setor de distribuição de veículos automotores no Brasil**. Departamento de tecnologia da informação. São Paulo: FENABRAVE, 2024.

GM. Manual do proprietário – Chevrolet Onix. São Caetano do Sul, 2023. Disponível em: https://meu.chevrolet.com.br/content/dam/gmownercenter/gmsa/gmbr/dynamic/manuals/2023/chevrolet/Onix/pt/om_ng-chevrolet_Onix_my23-pt_BR.pdf. Acesso em: 02 nov. 2024.

GOMES, P. G. **Análise teórica da determinação do atrito de rolamento para aerodesign**. Orientador: Jackson de Brito Simões. 2018. 41 p. Trabalho de graduação (Bacharel em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúba, 2018.

HALLIDAY, D. *et al.* **Fundamentos de física**. 8 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009. v. 1

IDAHO NATIONAL LABORATORY. **History of electric cars**. Idaho Falls, 2016. Disponível em: <https://avt.inl.gov/sites/default/files/pdf/fsev/HistoryOfElectricCars.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV data explorer**. Paris, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>. Acesso em: 8 ago. 2024.

JIA, W.; CHEN, T. D. Are Individuals' stated preferences for electric vehicles (EVs) consistent with real-world EV ownership patterns? **Transportation Research**, Oxford, v. 93, 2021. ISSN 1361-9209.

JONAS, H. **O princípio responsabilidade**: ensaio de uma ética para a civilização tecnológica. Ed PUC-Rio. Rio de Janeiro: Contraponto, 2006.

LIU, Y. *et al.* Comparative analysis of non-exhaust airborne particles from electric and internal combustion engine vehicles. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 420, 2021. ISSN 0304-3894.

LOTUS ENGINEERING INC. **An assessment of mass reduction opportunities for a 2017–2020 model year vehicle program**, Australia, 2010. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Mass_reduction_final_2010.pdf. Acesso em: 24 jul. 2024.

CADORINI NETO, J. Car body production project for electric vehicle using additive manufacturing. **Sodebras**, Palma, v. 18, n. 211, 2023a. ISSN 1809-3957.

CADORINI NETO, J. Dimensionamento e proposta de manufatura do chassi metálico de um veículo elétrico compacto. *In*: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP "DESAFIOS NA PRODUÇÃO DO CONHECIMENTO: DEMOCRATIZAÇÃO E DIVERSIDADE", 35., 2023, Atibaia. **Anais...** Atibaia: Even3 Publicações, 2023b.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Agenda 2030, Nova Iorque, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 8 ago. 2024.

PAIVA, S. *et al.* Enabling technologies for urban smart mobility: recent trends, opportunities and challenges. **Sensors**, Basel, v. 21, n. 6, 2021. ISSN 1424-8220.

PEREIRA, M. T. **Transição energética e redução de emissões no Brasil**: diagnóstico, avaliação do consumo e potenciais de melhoria. Orientador: Prof. Dr. Carlos Mady. 2023, 169

p. Dissertação de mestrado (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade de Campinas, Campinas, 2023.

PURDY, K. W. *et al.* **Early electric automobiles**. Encyclopaedia Britannica, [Chicago], 2024. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/automobile/Early-electric-automobiles>. Acesso em: 23 jul. 2024.

RICHARDSON, K. *et al.* Earth beyond six of nine planetary boundaries. **Science Advances**, Washington, v. 9, n. 37, 2023. ISSN 2375-2548.

SANGUESA, J. A. *et al.* A review on electric vehicles: technologies and challenges. **Smart Cities**, Basel, v. 4, p. 372 – 404, 2021. ISSN 2624-6511.

SHARP. B. **Hyundai HB20, no uso**. Autoentusiastas, [São Paulo], 11 dez. 2015. Disponível em: <https://autoentusiastas.com.br/2015/12/hyundai-hb20-uso/>. Acesso em: 02 nov. 2024.

SHARP, B. **Polo TSI, o primeiro Polo 1-litro turbo com câmbio manual**. Autoentusiastas, [São Paulo], 27 nov. 2022. Disponível em: <https://autoentusiastas.com.br/2022/11/polo-tsi-o-primeiro-polo-1-litro-turbo-com-cambio-manual-com-video/#:~:text=TSI,2%2F10%2C1%20segundos>. Acesso em: 02 nov. 2024.

SILVEIRA, F. L. Inclinação das ruas e das estradas. **Física nas escolas**, São Paulo, v. 8, n. 2, p. 16-18, 2007. ISSN 1983-6430.

SOUZA, T. M. **Instalações elétricas e aplicações**. 180 p. São Paulo: Páginas e Letras, 2013.

STELLANTIS. Ficha técnica – Fiat Argo Drive 1.3 Firefly Flex CVT. [Betim], 2023. Disponível em: <https://www.media.stellantis.com/uploads/br/attachment/4368/fichatecnicafiatargodrive13fireflyflexcvt-63c81dca14b4b.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2024.

TAVARES, L. A. Matriz elétrica brasileira e suas tendências futuras. **Revista Científica Multidisciplinar**, Jundiaí, v. 4, n. 5, 2023. ISSN 2675-6218.

THANGAVEL, S. *et al.* A comprehensive review on electric vehicle: battery management system, charging station, traction motors. **IEEE Access**, New York, v. 11, 2023. ISSN 2169-3536

TIPOS de baterias de carros elétricos: qual é a melhor? Knauf Industries, [Wolfgangtzen], 22 set. 2020. Disponível em: <https://knaufautomotive.com/pt-br/tipos-de-baterias-de-carros-eletricos/>. Acesso em: 02 nov. 2024.

TYPES of electric motors for electric vehicles: full guide. FUKUTA Elech&Mech, [Tongluo Township], 7 jun. 2024. Disponível em: https://www.fukuta-motor.com.tw/en/news_i/K06/N2024060700001. Acesso em: 12 out. 2024.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Data center for alternative fuels** – Batteries for electric vehicles. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington, 10 nov. 2018. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-batteries>. Acesso em: 17 ago. 2024.

WILBERFORCE, T. *et al.* Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. **International Journal of Hydrogen Energy**, Oxford, v. 42, n. 40, 2017. ISSN 0360-3199.

YANG, A. *et al.* Electric vehicle adoption in a mature market: A case study of Norway. **Journal of Transport Geography**, Oxford, v. 106, 2023. ISSN 0966-6923.

ZHANG, Z. *et al.* A review of technologies and applications on versatile energy storage systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 147, 2021. ISSN 1364-0321.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: Informações e documentação – Citações em documentos – Apresentação. Rio de Janeiro, 19 p., 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 68 p., 2018.

BIGOTO, R. B. **A importância do regime de serviço para escolha adequada do tamanho da carcaça de um motor elétrico**. [São Paulo], 12 fev. 2020. LinkedIn: Renan Barbosa Bigoto. Disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/import%C3%A2ncia-do-regime-de-servi%C3%A7o-para-escolha-tamanho-barbosa-bigoto>. Acesso em: 26 out. 2024.

ECARNOT, F. *et al.* Writing a scientific article: a step-by-step guide for beginners. **Europe Geriatric Medicine**, London, v. 6, n. 6, p. 573 – 579, 2015. ISSN 1878-7657.

INCROPERA, F. P. *et al.* **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7ª Ed. Barueri: LTC Editora - Grupo GEN, 2014.

PARMESAN, C.; YOHE, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. **Nature**, London, v. 421, n. 6918, p. 37 – 42, 2003. ISSN 1476-4687.