



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ADRIANY FABRÍCIA SILVA ALVES

Estudo de métodos para o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia de um
veículo elétrico tipo fórmula

Cabo de Santo Agostinho – PE

2024

ADRIANY FABRÍCIA SILVA ALVES

Estudo de métodos para o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia de um
veículo elétrico tipo fórmula

Monografia apresentada ao curso de
Graduação em Engenharia Elétrica da Unidade
Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho,
Universidade Federal Rural de Pernambuco,
como requisito para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Marcel Ayres de Araújo.

Cabo de Santo Agostinho – PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A474e Alves, Adriany Fabrícia Silva
Estudo de métodos para o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia de um veículo elétrico tipo fórmula / Adriany Fabrícia Silva Alves. - 2024.
94 f. : il.

Orientador: Marcel Ayres de Araujo.
Inclui referências.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Elétrica, Cabo de Santo Agostinho, 2024.

1. Sistema de armazenamento. 2. Baterias. 3. Veículos elétricos. I. Araujo, Marcel Ayres de, orient. II. Título

CDD 621.3

ADRIANY FABRÍCIA SILVA ALVES

Estudo de métodos para o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia de um veículo elétrico tipo fórmula

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em: 05/03/2024.

Banca examinadora

Prof. Dr. Marcel Ayres de Araújo
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Ania Lussón Cervantes
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Me. Rodrigo de Paiva Cirilo
Universidade Federal Rural de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por se fazer presente na minha vida e na daqueles que são preciosos para mim.

A minha família, que acima de todos os problemas e dificuldades, empenharam-se incansavelmente para que eu tivesse a oportunidade de estudar. Obrigada por todas as tentativas, persistências e esforços para que eu pudesse ser sempre a melhor versão de mim mesma. Vocês são o motivo mais bonito de toda a minha existência e serei eternamente grata por tê-los ao meu lado.

A todas as pessoas que cruzaram meu caminho ao longo desta jornada e que participaram de alguma forma para a realização deste trabalho. Em especial, ao meu seletor grupo de amigos, que me apoiaram e incentivaram durante todo o percurso. Apesar de já disperso e cada um seguindo suas vidas, ainda os levarei com grande carinho pela minha.

Agradeço a instituição UFRPE, a Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho e aos professores que passaram pela minha vida, compartilhando valiosos conhecimentos comigo. Agradeço por cada aprendizado, por moldarem minha percepção e pensamento ao longo desta jornada acadêmica, fundamentais para o meu crescimento pessoal e profissional.

Em especial, meu profundo reconhecimento ao meu orientador, Professor Marcel, que talvez não tenha ideia do quanto influenciou significativamente minha vida, principalmente nos momentos de crises existenciais e dúvidas sobre mim. A profissional que me tornarei deve muito aos seus conselhos, orientações, opiniões e compartilhamento de experiências. Estou ciente de que é algo que jamais conseguirei retribuir da mesma forma.

Por fim, gostaria de externar minha gratidão à Professora Ania, que mesmo estando pouco tempo em minha vida acadêmica, deixou uma marca indelével. Seu impacto foi significativo e jamais será esquecido.

Still workin' on my life, you know
(Beyoncé)

RESUMO

Diante da necessidade de redução de emissões de dióxido de carbono e visando a diminuição cada vez mais da frota de veículos a gasolina, entre outros derivados do petróleo, na tentativa de amortecer os danos da poluição causados ao meio ambiente, tem-se a implementação de Veículos Elétricos (VEs). Eles são um conceito geral de meio de transporte que aproveita o motor elétrico como o atuador de tração, e um dos principais tipos de VEs são os que utilizam bateria como um sistema de armazenamento de energia, também conhecidos como BEVs (*Battery Electric Vehicles*). Os BEVs são considerados uma solução que tem o potencial de atenuar as emissões de gases de efeito estufa e reduzir a utilização do petróleo no setor de transporte, evitando crises energéticas. Os VEs, apresentam uma evolução tecnológica de transformação da energia elétrica em movimento, que por consequência, tem aumentado o interesse pela propulsão elétrica para os automóveis nos últimos anos. Os mesmos, são projetados para serem competitivos em relação ao custo-benefício com veículos convencionais nos próximos anos. Diante de sua importância, este trabalho aborda um contexto significativo de crescimento da frota dos veículos elétricos a bateria no Brasil, desde suas características tecnológicas, seus desafios, potenciais problemas e benefícios, passando por seu sistema de transmissão de energia, e sua dinâmica de funcionamento. Posterior aos embasamentos teóricos e toda referência bibliográfica pesquisada, tem-se como principal objetivo, o estudo de dimensionamento desse sistema de armazenamento voltado aos BEVs aplicado a um VE do tipo fórmula. Como resultado, este estudo desenvolveu uma metodologia detalhada para dimensionar a potência, a força e a energia do veículo do tipo fórmula, baseada em uma análise aprofundada sobre o problema de roteamento de veículos elétricos, explorando suas diferentes variantes e possíveis abordagens de solução. Em seguida, procedeu-se ao dimensionamento do *pack* de baterias utilizando uma configuração série-paralelo empregada para suprir a potência exigida. Por último, a seleção da bateria foi conduzida por meio da análise estatística MCDA utilizando o método AHP-Gaussiano e AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson, resultando na escolha da célula SLPBA096235 como tecnologia implementada, que demonstrou valores nominais em concordância e compatíveis com as principais especificidades relacionadas aos VEs do tipo fórmula para o sistema dimensionado.

Palavras-chave: sistema de armazenamento; veículos elétricos; baterias.

ABSTRACT

Faced with the need to reduce carbon dioxide emissions and increasingly reduce the fleet of gasoline vehicles, among other petroleum derivatives, in an attempt to mitigate the damage caused by pollution to the environment, the implementation of Electric Vehicles (EVs). They are a general concept of means of transport that takes advantage of the electric motor as the traction actuator, and one of the main types of EVs are those that use batteries as an energy storage system, also known as BEVs (Battery Electric Vehicles). BEVs are considered a solution that has the potential to mitigate greenhouse gas emissions and reduce the use of oil in the transport sector, avoiding energy crises. EVs present a technological evolution of transforming electrical energy into movement, which consequently has increased interest in electric propulsion for automobiles in recent years. They are designed to be competitive in terms of cost-benefit with conventional vehicles in the coming years. Given its importance, this work addresses a significant context of growth in the battery electric vehicle fleet in Brazil, from its technological characteristics, challenges, potential problems and benefits, through its energy transmission system, and its operating dynamics. After the theoretical foundations and all bibliographical references researched, the main objective is to study the sizing of this storage system aimed at BEVs applied to a formula-type EV. As a result, this study developed a detailed methodology for sizing formula-type vehicle power, force and energy, based on an in-depth analysis of the electric vehicle routing problem, exploring its different variants and possible solution approaches. Next, proceed to sizing the battery pack using a series-parallel configuration used to supply the ordinary power. Finally, the battery selection was carried out through MCDA statistical analysis using the AHP-Gaussian and AHP-Gaussian with Pearson Correlation method, resulting in the choice of the SLPBA096235 cell as the discovered technology, which declared nominal values in agreement and compatible with the main specificities related to formula-type EVs for the scaled system.

Keywords: storage system; electric vehicles; batteries.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Frota atual de veículos elétricos no Brasil.	13
Figura 2 - <i>Ranking</i> de veículos elétricos por estados e cidade do Brasil.	13
Figura 3 - Recarga de uma bateria.	18
Figura 4 - Arquitetura de um BEV e sistema KERS.	18
Figura 5 - Processo eletroquímico de uma célula durante a descarga.	21
Figura 6 - À esquerda, o potencial de materiais catódicos do lítio que correspondem com as capacidades específicas destes materiais à direita.	25
Figura 7 - Representação das células do tipo <i>pouch</i>	26
Figura 8 - Célula prismática.	27
Figura 9 - Célula cilíndrica.	28
Figura 10 - Sistema de transmissão de movimento em BEV.	29
Figura 11 - Funcionamento do sistema de frenagem regenerativa.	31
Figura 12 - Escala global do BESS nos últimos anos.	33
Figura 13 - Demanda atual (2019) e futura (2040, cenário de desenvolvimento sustentável) por baterias em GWh.	34
Figura 14 - Principais materiais e componentes dos <i>packs</i> de baterias.	35
Figura 15 - Descrição das forças atuantes em veículos elétricos a) na subida e b) na descida.	37
Figura 16 - Forças que atuam sob o veículo no movimento ascendente.	44
Figura 17 - Configuração de células em série e paralelo.	50
Figura 18 - Circuito equivalente do módulo/células de baterias.	53
Figura 19 - Circuito equivalente do <i>pack</i> de baterias.	54
Figura 20 - Esquema simplificado do MCDA.	56
Figura 21 - Diagrama da metodologia.	64
Figura 22 - Veículo do tipo fórmula utilizado.	65

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos principais tipos de baterias de íon-lítio.	23
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens das células de bateria.	28
Tabela 3 - Comparação entre motor a combustão e motor elétrico.	30
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens da utilização do sistema KERS.	31
Tabela 5 - Escala Fundamental de Saaty.	60
Tabela 6 - Características do veículo.	65
Tabela 7 - Especificidades das células disponibilizadas.	66
Tabela 8 - Dimensionamento do BESS e do <i>pack</i> de baterias.	70
Tabela 9 - Matriz de decisão formada com as especificidades das baterias.	71
Tabela 10 - Matriz de decisão normalizada.	72
Tabela 11 - Valores para nova definição dos pesos da matriz de decisão no método AHP-Gaussiano.	73
Tabela 12 - Seleção final a partir do <i>ranking</i> de células das baterias com o método AHP-Gaussiano.	74
Tabela 13 - Matriz de critério vs critério.	75
Tabela 14 - Valores para nova definição dos pesos da matriz de decisão no método AHP-Gaussiano com correlação de Pearson.	77
Tabela 15 - Seleção final a partir do <i>ranking</i> de células das baterias com o método AHP-Gaussiano com correlação de Pearson.	78
Tabela 16 - Resultado normalizado e comparação entre o método AHP-Gaussiano e AHP-Gaussiano Pearson.	79
Tabela 17 - Resultado geral do método AHP-Gaussiano.	81
Tabela 18 - Resultado geral do método AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson.	84

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	15
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	TECNOLOGIA DE BATERIAS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS	17
2.2	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS BATERIAS.....	18
2.3	BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO	20
2.4	DESIGN DAS CÉLULAS DE BATERIAS	25
2.5	TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO EM UM BEV	28
2.6	SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR BATERIAS.....	32
2.7	MÉTODOS PARA MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO DO BESS	36
2.7.1	Modelos de Estimação da Energia em BEV	36
2.7.1.1	Electric vehicle's electricity consumption on a road with different slope.....	36
2.7.1.2	Electric vehicle's energy consumption measurement and estimation	39
2.7.1.3	Sensitivity analysis for energy demand estimation of electric vehicles	43
2.7.1.4	A Survey on the Electric Vehicle Routing Problem: Variants and Solution Approaches.....	46
2.8	DIMENSIONAMENTO DO PACK DE BATERIAS DO VEÍCULO ELÉTRICO.....	49
2.9	SELEÇÃO DA CÉLULA DE BATERIA A PARTIR DO DIMENSIONAMENTO DO BESS.....	54
2.10	MÉTODO AHP	59
2.11	MÉTODO AHP-GAUSSIANO	61
2.12	MÉTODO AHP-GAUSSIANO COM CORRELAÇÃO DE PEARSON	62
3	METODOLOGIA PROPOSTA.....	63
3.1	CARACTERÍSTICAS DO VEÍCULO ELÉTRICO	64

3.2	DIMENSIONAMENTO DO BESS.....	65
3.3	DEFINIÇÃO DA TECNOLOGIA DE BATERIA.....	67
4	IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	69
4.1	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	80
5	CONCLUSÃO.....	88
	REFERÊNCIAS.....	91

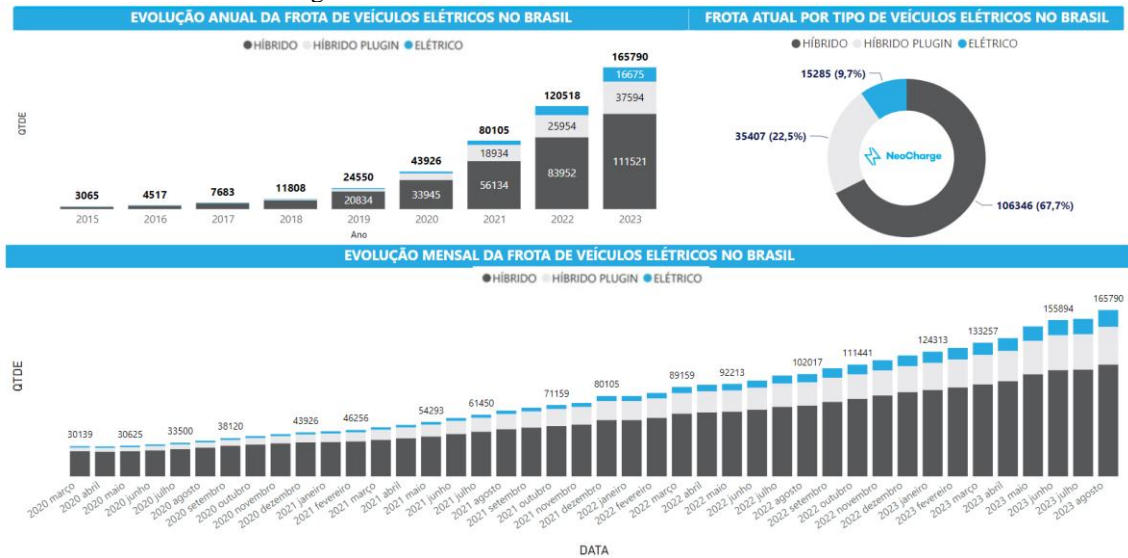
1 INTRODUÇÃO

Com uma crescente significativa nos últimos 30 anos, o nível de gás carbônico (CO₂) quase dobrou no período de 1970 a 2005, o que trouxe consequências como um aumento na temperatura global e uma série de mudanças climáticas dramáticas, além de ser considerado como o principal fator de risco da atual economia energética baseada em combustíveis fósseis, que aumentaram a uma taxa constante (Scrosati; Garche, 2010). Outro aspecto preocupante desta economia está associado à procura contínua por petróleo, causando um esgotamento de recursos não renováveis e a dependência de países produtores de petróleo politicamente instáveis. Diante de tais fatos, os Veículos Elétricos (VEs) podem ser um dos responsáveis por reduzir emissões de gases de efeito estufa, tornando dispensável a utilização de combustíveis fósseis no setor de transporte.

Com um aumento nos volumes de produção e redução no custo das baterias, os VEs são projetados para serem vantajosos em termos de custo em comparação aos veículos convencionais nos próximos 10 anos (Shah *et al.*, 2019). A necessidade de renovação da matriz energética exige o uso de fontes de energias renováveis e em níveis superiores ao atualmente em vigor, uma vez que a consequente poluição do ar em grandes áreas urbanas, por exemplo, pode ser reduzida substituindo os carros com motor de combustão interna, ou ICE (*Internal Combustion Engine*) por veículos com emissão controlada, que são os *Hybrid Electric Vehicle* (HEVs) e/ou *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (PHEVs) (Scrosati; Garche, 2010).

A empresa de serviços e infraestrutura para a mobilidade elétrica NeoCharge (2024) desenvolveu um portal com dados compilados do Departamento Nacional de Trânsito (Denatran) sobre o volume da frota de carros elétricos, híbridos e híbridos *plug-in* no Brasil. Na Figura 1, são apresentados dados da evolução anual da frota de veículos elétricos no Brasil desde 2015 até os dias atuais, sejam eles elétricos, híbridos ou híbridos *plug-in*. Nela é possível observar que de toda a frota dos veículos, cerca de 67,7% são devido aos HEVs e 9,7% aos VEs. Já na Figura 2, é exposta a distribuição de veículos elétricos por estados e cidades do país, demonstrando que dentro do estado de Pernambuco, a maior concentração da frota de veículos elétricos está situada na cidade de Recife – PE com cerca de 4%.

Figura 1 - Frota atual de veículos elétricos no Brasil.



Fonte: NeoCharge, 2024.

Figura 2 - Ranking de veículos elétricos por estados e cidade do Brasil.



Fonte: NeoCharge, 2024.

É perceptível dessa forma que, um dos próximos desafios enfrentados pelos Sistemas de Distribuição (SD) é a integração ocasional e abrupta de veículos elétricos na rede, impulsionados pelos avanços na eletrônica de potência e nas tecnologias de baterias. Conseqüentemente, a rápida utilização dos VEs é uma solução promissora para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mitigando o problema do aquecimento global citado anteriormente, e utilizando Geração Distribuída renovável (GD). No entanto, o cenário descrito acima é acompanhado por um crescimento incerto da demanda de eletricidade, e no contexto da expansão dos sistemas de distribuição que garantam a confiabilidade da entrega de energia elétrica, o comportamento aleatório dos condutores de VEs e os vários modos de carregamento

ainda não são estudados. Além disso, o crescimento anual da demanda de eletricidade e os intervalos de tempo dos modos de carregamento normal e carregamento rápido são desconsiderados em alguns trabalhos na literatura, e a importância da consideração dos aspectos mencionados visa evitar subinvestimentos e possíveis problemas operacionais (Ehsan, 2020). Outro desafio no contexto dos VEs é a necessidade de uma quantidade significativa de tempo para serem recarregados, sendo que, recarregar totalmente um VE, mesmo com um sistema de armazenamento de pequena capacidade (por exemplo, 16 - 24 kWh) demanda várias horas. Essa limitação de tempo de recarga prejudica severamente a usabilidade dos VEs, mesmo para fins de transporte urbano de curta distância (Kuran *et al.*, 2015).

Diante do exposto, é notável a importância dos investimentos tanto para a exploração de recursos energéticos renováveis, que são crescentes em todo o mundo, quanto para a GD por meio de recursos dos sistemas fotovoltaicos e eólicos, que devido a intermitência dos mesmos, são exigidos sistemas de armazenamento de energia de alta eficiência. Logo, sistemas eletroquímicos, como baterias e supercapacitores, que podem armazenar e fornecer energia sob demanda de forma eficiente, garantindo também um nivelamento de carga da rede elétrica em sistemas integrados, estão desempenhando um papel crucial neste campo (Shah *et al.*, 2019). Ainda segundo o referido autor, as baterias também são vistas como as fontes de energia de escolha para o transporte sustentável, pois são consideradas as melhores opções que podem garantir efetivamente a difusão progressiva de VEs e HEVs.

Com a necessidade em reduzir as emissões de gases poluentes e promover a transição para veículos elétricos, este estudo se propõe a abordar uma questão fundamental: o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia para os VEs. Dessa forma, é essencial o desenvolvimento de métodos eficazes de dimensionamento, estimação da demanda energética, compreensão e escolha acerca das tecnologias de baterias mais adequadas. Por meio de uma abordagem metodológica abrangente, que inclui revisões bibliográficas, pesquisa de metodologias de dimensionamento e simulação computacional, este trabalho busca contribuir com uma base sólida para futuras iniciativas de pesquisa e desenvolvimento nessa área.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é o desenvolvimento de um estudo para o dimensionamento do sistema de armazenamento de energia de um veículo do tipo fórmula a partir da análise de informações de demanda energética do veículo e da especificidade de diferentes tecnologias de baterias. Para alcance do objetivo, os procedimentos específicos estão definidos nas seguintes etapas:

- Pesquisa e identificação das especificidades, requisitos e parâmetros essenciais das principais tecnologias de armazenamento de energia aplicáveis a veículos elétricos;
- Pesquisa e avaliação de métodos de estimação da demanda energética de veículos elétricos em diferentes cenários de consumo de energia;
- Levantamento e análise de métodos e ferramentas de dimensionamento do sistema de armazenamento de energia de veículos elétricos;
- Proposição de uma metodologia de dimensionamento e seleção de baterias para o sistema de armazenamento de energia para um veículo elétrico.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1, é introduzido o contexto de desenvolvimento, expansão e implementação no cenário atual referente aos veículos elétricos a bateria. Discute-se também a evolução da frota de VEs no Brasil e os desafios enfrentados pelos sistemas de distribuição de energia devido à integração desses veículos. Além disso, aborda-se a importância dos investimentos em energias renováveis e sistemas de armazenamento de energia eficientes, para promover o transporte sustentável e garantir a estabilidade da rede elétrica. Por fim, o capítulo também argumenta da importância do trabalho para o meio de pesquisa em sistemas de armazenamento de energia dos VEs a bateria.

No capítulo 2, será apresentada a fundamentação teórica baseada nas revisões bibliográficas a respeito das principais tecnologias de baterias para armazenamento de energia aplicáveis a veículos elétricos a fim de identificar especificidades, requisitos e parâmetros essenciais para seleção das mesmas. O capítulo também discorre sobre o conteúdo dos modelos encontrados na literatura para estimação da energia dos veículos elétricos a bateria, e

posteriormente, trata dos métodos a serem utilizados no estudo para o dimensionamento do sistema.

No capítulo 3, após análise das informações levantadas e com base nos argumentos dissertados ao longo deste trabalho, será proposto e elucidado uma metodologia para o dimensionamento do sistema de armazenamento de um BEV do tipo fórmula, com base na seleção de uma tecnologia de bateria. Este capítulo descreverá todos os procedimentos para implementação em uma ferramenta computacional a fim de simular, validar e identificar pontos críticos bem como propor melhorias.

No capítulo 4, será exposta a implementação da metodologia proposta com a simulação na ferramenta Excel da Microsoft®, com o objetivo de identificar a tecnologia das baterias para o cenário de demanda energética do veículo elétrico do tipo fórmula SAE. Posteriormente, também serão fornecidos comentários, discussões e avaliações a respeito tanto do método quando da tecnologia selecionada.

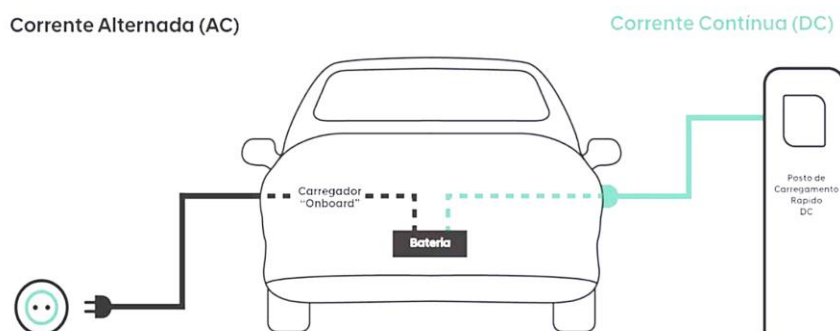
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TECNOLOGIA DE BATERIAS PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os veículos elétricos diferem dos veículos a combustão interna devido a fonte de energia para alimentar o motor e realizar a tração das rodas, uma vez que, os de combustão utilizam a energia da queima de combustível para locomover o automóvel, e os veículos elétricos apresentam uma bateria como fonte de energia. Nestes veículos, comumente chamados de BEV (*Battery Electric Vehicle*), a bateria principal age como local de armazenamento da energia necessária para tração das rodas, e a secundária como função auxiliar apenas para alimentação de acessórios internos (Volan, 2020). Os VEs, mais especificamente os BEVs, exigem o uso e peças de reposição com menos frequência além de não possuírem itens como caixas de câmbio, bombas de combustível, filtros, correias, injetores, radiadores e alternadores. Essa característica faz com que os VEs possuam custos de manutenção mais baixos do que os veículos ICEs. Em contrapartida, os custos de produção permanecem substancialmente elevados, principalmente na produção de baterias, que atualmente representam um dos principais desafios tecnológicos a serem superados (Volan, 2020).

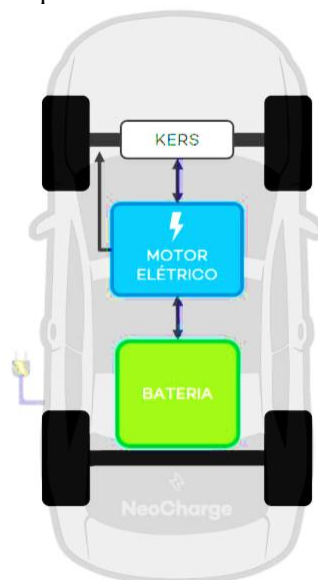
Os BEVs possuem um motor elétrico no lugar do motor de combustão interna e utilizam uma tecnologia de bateria tracionária para armazenar uma quantidade de energia que posteriormente será transmitida ao motor para fazer o acionamento das rodas do veículo. Quando o pedal do acelerador é pressionado, a energia armazenada na bateria é gradualmente consumida, que por sua vez, é normalmente carregada em corrente alternada por meio de um carregador com conector padrão, já em estações de carga rápida ou eletropostos, a recarga acontece em corrente contínua como exemplifica a Figura 3. O motor também pode funcionar como um gerador de energia em momentos de desaceleração do veículo, mecanismo conhecido como frenagem regenerativa (KERS), sendo discutida com o decorrer deste trabalho, assim, sua configuração final pode ser vista na Figura 4. A frenagem resgata a energia que seria perdida em forma de calor nas pastilhas de freio e armazena na bateria, ocasionando na melhoria da autonomia do veículo (Neocharge, 2024).

Figura 3 - Recarga de uma bateria.



Fonte: Baltazar e Araújo, 2021.

Figura 4 - Arquitetura de um BEV e sistema KERS.



Fonte: NeoCharge, 2024.

2.2 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS BATERIAS

As baterias são armazenadores de energia na forma de células eletroquímicas que geram energia elétrica a partir do processo químico de troca de elétrons, chamado de oxirredução. O polo negativo é denominado anodo, no qual ocorre a oxidação, enquanto o positivo é o catodo, em que ocorre a redução. No estado de descarga das baterias, os elétrons se movem do anodo para o catodo gerando energia elétrica, já em estado de carga, o movimento se dá no sentido inverso convertendo em energia química (Castro; Barros; Veiga, 2013) e (Silveira, 2020).

A reação eletroquímica que ocorre no interior das células, estabelece uma diferença de potencial entre o polo positivo e negativo, e devido ao fato das tensões geradas nas células serem mínimas, para se tornarem úteis em aplicações mais significativas, elas são ligadas em

serie e/ou paralelo, e posteriormente encapsuladas formando uma bateria (Krempser, 2013). As principais características das baterias são (Fernandes, 2017), (Magdalon, 2021) e (Silveira, 2020):

- **Capacidade nominal (Wh):** quantidade de ampères-hora (Ah) que pode ser retirada da bateria quando está em plena carga;
- **Densidade de energia (Wh/kg):** capacidade nominal de uma bateria normalizada por unidade de massa ou volume (ou Wh/L). Tal medida expressa que quanto maior a densidade de energia de uma bateria, menor será a massa e o volume necessários para se retirar ou armazenar uma determinada quantidade de energia;
- **Estado de carga ou State of Charge (SoC):** capacidade disponível na bateria em um determinado momento, sendo expresso em porcentagem da capacidade nominal. Exemplificando, se 25 Ah fossem retirados de uma bateria com capacidade nominal de 100 Ah, o estado de carga seria de 75%. Este parâmetro é complementar à profundidade de descarga;
- **Profundidade de descarga ou Depth of Discharge (DoD):** indica em porcentagem da capacidade nominal, o quanto foi retirado da bateria em um determinado momento, sendo complementar ao estado de carga. Exemplificando, se 25 Ah fossem retirados de uma bateria com capacidade nominal de 100 Ah, a profundidade de descarga seria de 25%;
- **Taxa de carga e descarga:** valor da corrente elétrica aplicada em uma bateria durante o processo de carga ou descarga. Pode ser expressa também como o valor da capacidade nominal da bateria pelo intervalo de carregamento;
- **Ciclo:** sequência de carga-descarga de uma bateria até alcançar uma determinada profundidade de descarga;
- **Temperatura operacional:** temperatura de funcionamento das baterias e um dos fatores mais importantes para a sua longevidade. Para baterias de íon de lítio a faixa é de 20 °C a 40 °C, por exemplo;

- **Densidade de potência (W/l):** potência disponível por unidade de volume. Parâmetro que define o desempenho pretendido no volume do *pack* de baterias;
- **Densidade energética (Wh/l):** quantidade de energia armazenada por unidade de volume. Tendo conhecimento da densidade energética da bateria e o consumo do veículo, é possível chegar ao volume necessário para o *pack* de baterias;
- **Potência (W):** quantidade de energia que uma bateria fornece por unidade de tempo;
- **Resistência interna (Ω):** corresponde a diferença do fluxo de corrente no interior de uma célula ou bateria;
- **Tensão nominal (V):** é a tensão de referência da bateria, variando conforme a composição química tipo de ligação e quantidade de células e módulos em paralelo/série de uma bateria.

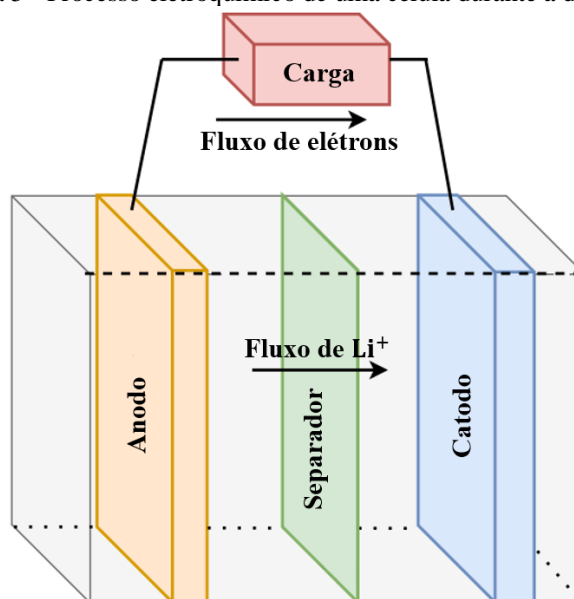
2.3 BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

As baterias utilizadas em veículos elétricos são geralmente categorizadas de acordo com a sua capacidade de carga, que seria a quantidade de energia que pode ser armazenada, e assim, quanto maior a capacidade da bateria maior será a autonomia do veículo e conseqüentemente o tempo para carregar completamente, tal quantidade é expressa como a quantidade de corrente pelo tempo em horas de descarga até uma tensão de 1,75 V. Essa categorização está dividida entre baterias primárias e secundárias, as primárias são descartáveis ou utilizadas apenas uma vez, já as secundárias são relacionadas as baterias anteriormente utilizadas em veículos elétricos, e que não são mais viáveis para esses veículos, sendo necessária à sua reciclagem ou reaproveitamento para outras aplicações, isso quer dizer que as secundárias têm a capacidade de carregar quando totalmente descarregadas.

Para os veículos elétricos, a tecnologia de bateria do tipo secundária que constituirá o objeto do presente trabalho, será a de íon-lítio, esta por sua vez, apresenta maior densidade energética, maior nível de potência e menor peso em comparação a outros tipos de tecnologia de baterias (Shah *et al.*, 2019) e (Onar *et al.*, 2012). Uma célula de íon de lítio típica consiste em quatro componentes principais sendo representado na Figura 5, são eles: o eletrodo negativo (anodo) e eletrodo positivo (catodo), ambos sendo de material ativo que é ligado a um coletor

de corrente, o eletrólito, que consiste em um condutor iônico (geralmente líquido) fornecendo caminho para a transferência de íons entre os dois eletrodos e por último, o separador, usado para separar os eletrodos mecanicamente e bloquear a transferência direta de elétrons entre os eletrodos (Lidbeck; Syed, 2017).

Figura 5 - Processo eletroquímico de uma célula durante a descarga.



Fonte: Adaptado de Lidbeck e Syed, 2017.

Entre as baterias lítio-íon, é possível identificar diferentes categorias e aplicações, uma vez que os anodos e cátodos podem conter diversos materiais e composições químicas, sendo assim, cada uma das combinações possíveis está associada a distintas vantagens e desvantagens em termos de segurança, rendimento, desempenho, custo e outros parâmetros. Os principais tipos de baterias lítio-íon são comentados a seguir, juntamente com a Tabela 1, que apresenta as vantagens e desvantagens de cada uma dessas tecnologias (Magdalon, 2021), (Castro; Barros; Veiga, 2013) e (Bermúdez; Consoni; Luciane, 2020):

- **NCA (Níquel Cobalt Aluminium – LiNiCoAlO_2):** é um eletrodo que apresenta densidade de energia e potência específica elevada, assim como o ciclo de vida longo, porém com baixa estabilidade térmica, o que reduz a segurança;
- **NMC (Níquel Manganese Cobalto – LiNiMnCoO_2):** apresenta uma combinação de LCO, LMO e níquel que o faz popular devido ao ciclo de vida elevado e a alta densidade energética. É na exata mistura de Co, Ni e Mn que define as propriedades do cátodo

como rico em Ni para fornecer energia específica elevada. As células do tipo NMC são muito utilizadas em veículos elétricos devido à sua densidade de energia elevada e baixa taxa de autodescarga;

- **LCO (Lithium Cobalt Oxide – LiCoO_2):** é um eletrodo antigo, com custo médio e elevada densidade de energia, apesar de apresentar algumas desvantagens de segurança ainda é usado com frequência principalmente em tablets e laptops;
- **LFP (Lithium Iron Phosphate – LiFePO_2):** apresenta propriedades conforme composição química para um ciclo de vida útil boa, é utilizado frequentemente em conjunto com o ânodo LTO por obter um ciclo de vida útil excelente. O LFP tem estabilidade em condições de sobrecarga e suporta temperaturas altas sem sofrer alterações, além de ser um tipo de cátodo que é mais confiável e mais seguro do que os LCO e LMO;
- **LMO (Lithium Manganese Oxide - LiMn_2O_4):** é o eletrodo mais antigo usado comercialmente, por ser de baixo custo, apesar da vida útil limitada que é considerado uma desvantagem, mas com uso frequente proporciona estabilidade térmica elevada e segurança;
- **LTO (Lithium Titanium Oxide - $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$):** os anodos de titânio de lítio são substitutos do grafite no anodo de uma bateria de lítio-íon, já o catodo pode ser do tipo NMC. Essas baterias são muito seguras, e dentre as baterias de lítio, são as que têm maior vida útil. No entanto, a menor tensão de 2,4 V, implica em baixa energia por volume similar à bateria do tipo NiCd, além disso, tem custo mais elevado.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos principais tipos de baterias de íon-lítio.

Tipo	Vantagens	Desvantagens	Aplicações	Maturidade para VEs
NCA	Baixo custo relativo Densidade energética 20% superior à da LCO	Menor eficiência das reações de carga e descarga da bateria em relação ao cobalto	Grande importância nos sistemas de armazenamento e <i>powertrain</i>	Já presente em alguns carros de série
		Limitada estabilidade térmica e baixa retenção da capacidade durante o ciclo		
NMC	Baixo custo relativo Densidade energética 20% superior à da LCO	Grande pico exotérmico durante a carga (em torno de 200°C)	Ferramentas, <i>e-bikes</i> , VEs e medicina	Utilizada em eletrônicos de consumo e protótipos de veículos elétricos
		Menor eficiência das reações de carga e descarga da bateria em relação ao cobalto		
LFP	Menor impacto ambiental, maior estabilidade e menor custo em relação à bateria de Co	Grande pico exotérmico durante a carga (em torno de 200°C)	Ferramentas, <i>e-bikes</i> , VEs e medicina	Já presente em alguns carros de série

(continua)

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens dos principais tipos de baterias de íon-lítio.

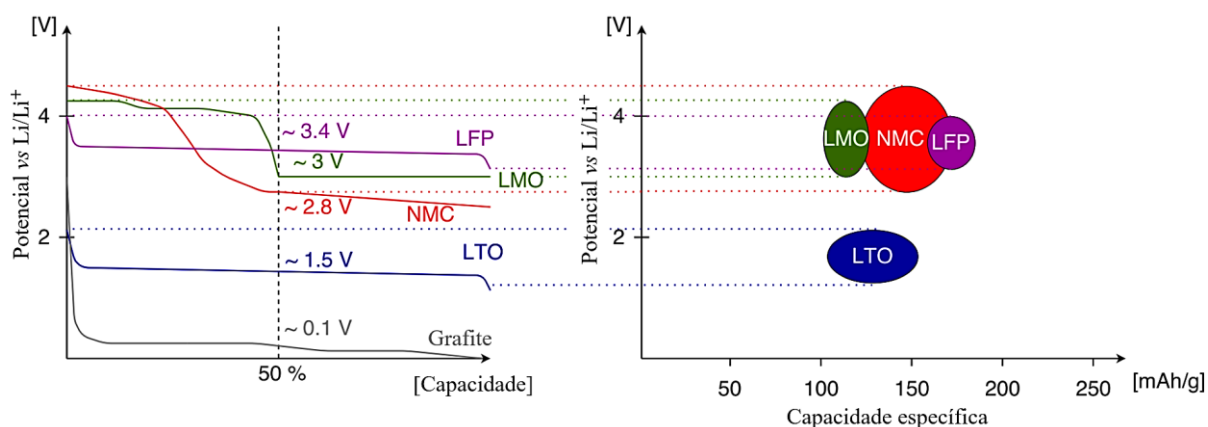
Tipo	Vantagens	Desvantagens	Aplicações	Maturidade para VEs
LMO	Preços dos compostos de manganês inferiores aos de cobalto, gerando menos impacto ao meio ambiente	Progressiva perda de capacidade durante a descarga	Menor capacidade que o Li-cobalto, porém, alta potência específica e tempo de vida	Já presente em alguns carros de série
LCO	Capacidade específica elevada	Reduzida segurança intrínseca e vida cíclica Custo elevado Baixa faixa operacional de temperatura e baixa disponibilidade materiais (Co)	Alta capacidade Portáteis e câmeras	Utilizado nos primeiros veículos do modelo Tesla, mas rejeitado para uso em carros de série por problemas de segurança
LTO	Maior segurança e longa vida útil Carga rápida Ampla faixa de temperatura	Elevado custo	Grande importância nos sistemas de armazenamento e <i>powertrain</i>	-

(conclusão)

Fonte: Adaptado de Castro, Barros e Veiga, 2013.

O potencial eletroquímico representa a facilidade com a qual o substrato ganha ou perde elétrons, e no caso das células de íons de lítio, para determinar seu potencial padrão, são somados o potencial de oxidação do anodo e o de redução do cátodo. A Figura 6 demonstra como para algumas das tecnologias, o potencial está relacionado ao Li/Li^+ , sendo possível observar que o alcance operacional do LMO e NMC é limitado a cerca de 50%. Já o LFP e LTO podem ser utilizados perto de 100% de sua capacidade. O grafite também se destaca, em relação ao material anódico, tornando-se amplamente utilizado atualmente, devido a aspectos de custo e desempenho, mas outros materiais como LTO também são usados, no entanto, isso resulta em uma tensão de célula mais baixa que é evidente na Figura 6 (Lidbeck e Syed, 2017).

Figura 6 - À esquerda, o potencial de materiais catódicos do lítio que correspondem com as capacidades específicas destes materiais à direita.



Fonte: Adaptado de Lidbeck e Syed, 2017.

2.4 DESIGN DAS CÉLULAS DE BATERIAS

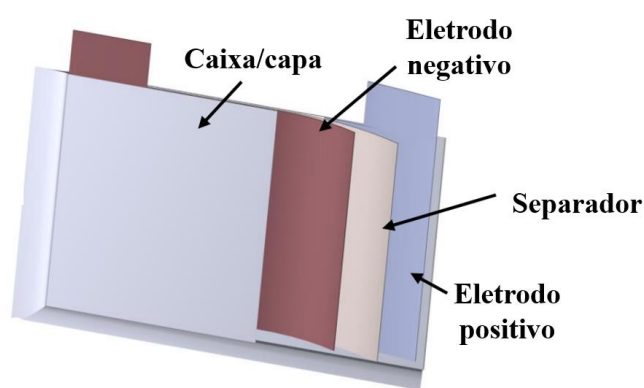
Os veículos elétricos utilizam majoritariamente baterias de íons de lítio, e quanto à sua configuração, as células desta tecnologia de bateria podem ser do tipo: *pouch*, prismáticas ou cilíndricas, e são comentadas abaixo, de acordo com a literatura dos trabalhos de Krempser (2013), Lidbeck e Syed (2017), Silveira (2020) e Magdalon (2021).

A. *Pouch*

As células do tipo *pouch*, como mostra a Figura 7, possuem os eletrodos divididos por um separador, e por não apresentarem um invólucro em metal, sendo nesse caso envoltas por bolsas de papel alumínio com costuras seladas, faz com que sejam leves e compactas, assim, a

célula precisa de suporte e espaço para se expandir no compartimento da bateria por serem células finas, sendo vantajoso pois permite o empilhamento, possuindo também a grande capacidade de remoção de calor. Devido ao seu design compacto, as células *pouch* não devem ser sujeitas a elevadas correntes de carregamento, podendo ocorrer a dilatação das mesmas. A capacidade das células de bolsa geralmente está na faixa de 0,1 - 100 Ah, também sendo capazes de fornecerem elevadas correntes de carga, mas funcionam melhor em condições de carga leve e moderada.

Figura 7 - Representação das células do tipo *pouch*.

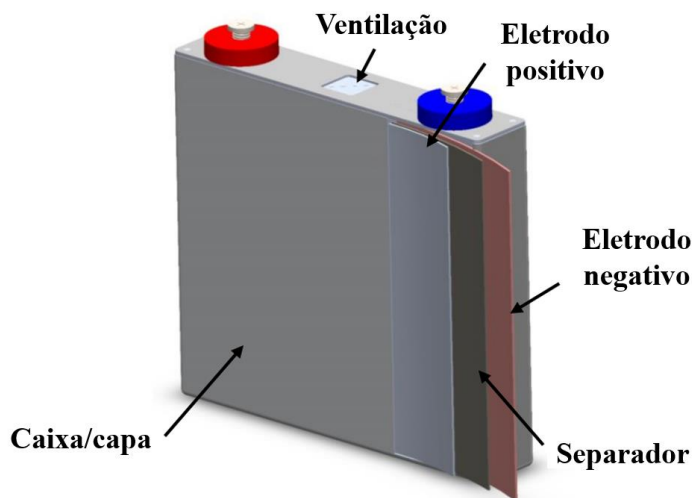


Fonte: Adaptado de Lidbeck e Syed, 2017.

B. Prismáticas

Com um *design* semelhante às *pouch*, as células prismáticas voltadas à aplicação em veículos elétricos, apresentam um invólucro em alumínio como mostra uma seção transversal da Figura 8, utilizado para proteção contra descargas elétricas, mas também ajuda na remoção do calor gerado da sua utilização. Elas possuem uma capacidade nominal entre 20 Ah e 100 Ah e melhoram a utilização do espaço no qual estão inseridas permitindo um design flexível, mas podem ter um elevado custo de fabricação, além de serem menos eficiente no gerenciamento térmico e possuir um ciclo de vida mais curto do que o design cilíndrico. A produção da caixa metálica da célula prismática é mais complexa, contudo, oferece um elevado nível de segurança e densidade de energia, e se destacam como o formato de célula mais comum em carros elétricos.

Figura 8 - Célula prismática.

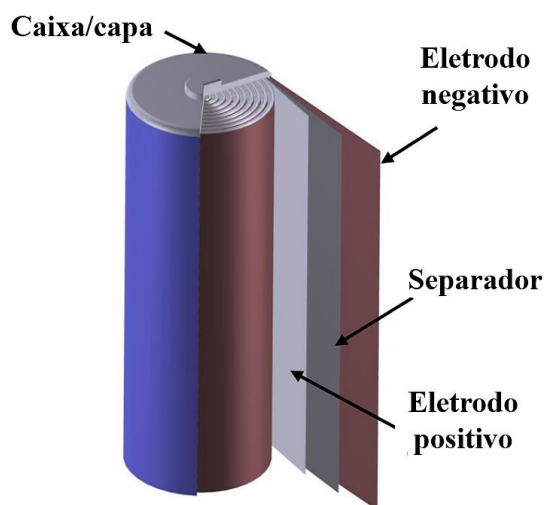


Fonte: Adaptado de Lidbeck e Syed, 2017.

C. Cilíndricas

A célula cilíndrica é uma tecnologia de fácil fabricação e boa estabilidade mecânica, se destacando como um dos estilos de embalagem mais utilizados para baterias primárias e secundárias, seu formato de cilindro tubular conforme a Figura 9 pode suportar altas pressões internas sem se deformar, além de suas células possuírem elevada densidade energética. A capacidade das células cilíndricas está tipicamente na faixa de 0,5 - 50 Ah e devido ao seu design, este tipo de célula é limitado em termos de quantidade máxima de carga, em que nesse caso, torna-se necessário a utilização de muitas células para um alto desempenho. Os tipos mais utilizados são os 18650 e 21700 e contrastando com a maioria das células prismáticas empilhadas ou com as do tipo *pouch*, as cilíndricas consistem em apenas um anodo e catodo, sendo enrolados em um rolo cilíndrico separadamente por um separador e cuja desvantagem desta característica cilíndrica se dá pelo espaço ocupada por ela.

Figura 9 - Célula cilíndrica.



Fonte: Adaptado de Lidbeck e Syed, 2017.

Uma síntese das vantagens e desvantagens em relação aos três tipos de *design* de células para baterias de veículos elétricos é apresentada na Tabela 2, demonstrando que por exemplo, as células cilíndricas possuem a vantagem de baixo custo em relação as outras células.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens das células de bateria.

	Vantagens	Desvantagens
<i>Pouch</i>	Facilidade de remoção de calor	Baixas correntes de carga e descargas
Prismáticas	Proteção contra descargas elétricas	Alto custo e elevado volume ocupado
Cilíndricas	Elevada densidade energética e baixo custo	Baixos ciclos de vida

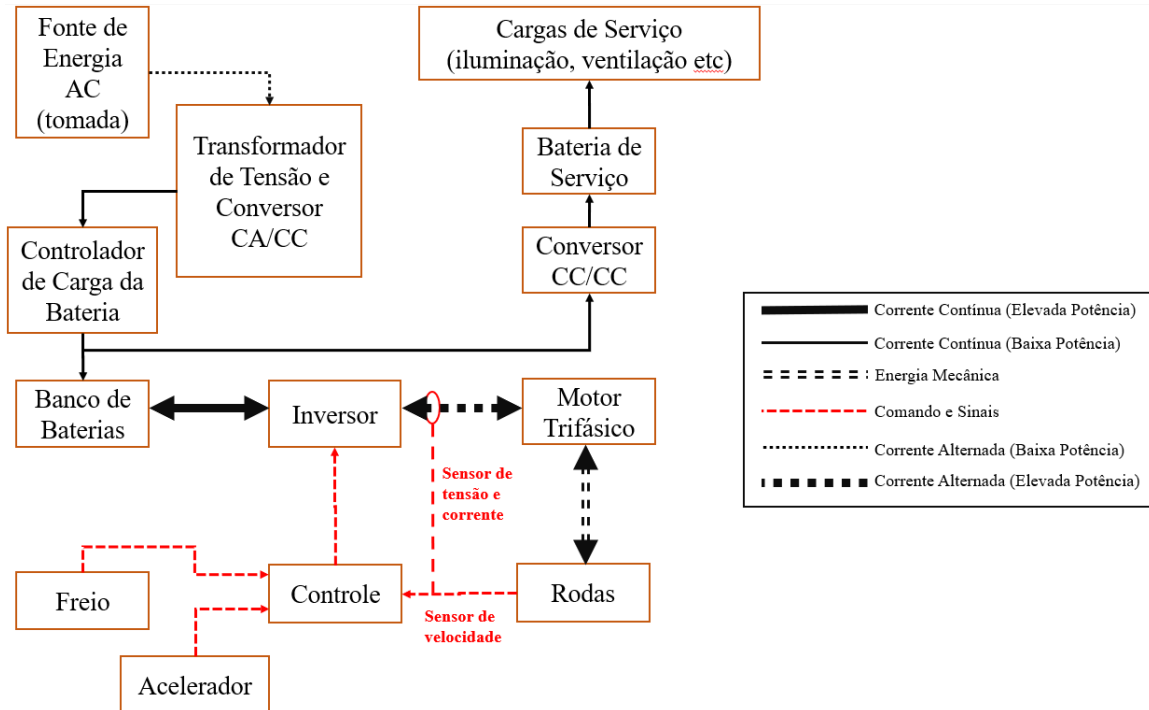
Fonte: Silveira, 2020.

2.5 TRANSMISSÃO DE MOVIMENTO EM UM BEV

Um veículo elétrico CC/CA (corrente contínua da bateria e corrente alterada no motor), pode ser exposto de acordo com o diagrama de blocos apresentado no trabalho de (NOCE, 2009) conforme a Figura 10, em que, as setas que apontam entre o banco de baterias e o inversor, entre este e o motor trifásico e por último entre o motor e as rodas, indicam que o fluxo de energia ocorre nos dois sentidos, nesse caso, o banco de baterias de tração cede energia para a movimentação do veículo e, quando em frenagem regenerativa, recupera parte da energia cinética do veículo sob a forma de energia eletroquímica, no banco de baterias. O diagrama

representa também o carregamento do banco de baterias de tração e da bateria de serviço, encarregada de armazenar e fornecer energia para o sistema elétrico convencional do veículo, o qual é composto pelas cargas dos sistemas de iluminação, ventilação, arrefecimento, áudio e alarme, dentre outros, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Sistema de transmissão de movimento em BEV.



Fonte: Adaptado de Noce, 2009.

Aprofundando mais a discussão acerca do diagrama, e conforme exposto anteriormente, em um veículo elétrico, a energia responsável por alimentar o motor vem de uma bateria. Um inversor converte a corrente contínua da bateria em corrente alternada, que é utilizada para acionar o motor elétrico e consequentemente tracionar as rodas. Porém, há um processo de recarga da bateria além de uma fonte externa associada a mesma, como uma tomada. Para melhor compreensão do processo de forma geral, alguns tópicos serão explicados a seguir.

A. Motor elétrico

Existem duas categorias que distinguem os motores elétricos dos motores a combustão, os de Corrente Contínua (CC) e Corrente Alternada (CA). Os motores de indução que são de CA, estão entre os mais comuns e com melhores custo-benefício do mercado, principalmente

na utilização em automóveis. Eles possuem uma parte fixa e outra girante, respectivamente denominadas como estator e rotor e não precisam de imãs permanentes isso porque o campo magnético é produzido pela corrente elétrica que passa pelas bobinas que estão fixas no estator, induzindo tensão e corrente no enrolamento do rotor. Esta indução faz com que o rotor produza seu próprio campo magnético que, automaticamente, tentará alinhar-se ao campo magnético do estator, uma vez que o estator gera campo magnético alternado, o rotor tende a girar seu campo magnético de forma a acompanhar o do estator. Os motores de indução possuem um elevado torque de partida, e como o motor utilizado para carros elétricos, geralmente, requer alto torque em baixas velocidades permitindo que o veículo atenda às necessidades da aceleração, os de indução atendem tais requisitos (SOUZA, 2018) e (NEOCHARGE, 2024). Na Tabela 3 é apresentado um comparativo de um levantamento feito pela NeoCharge (2024) entre motores a combustão e motores elétricos, destacando as principais vantagens da utilização destes em VEs.

Tabela 3 - Comparação entre motor a combustão e motor elétrico.

Motor a Combustão	Motor Elétrico	Vantagens do Motor Elétrico
1 – 3 kW/kg	3 – 10 kW/kg	3x mais potente
400 kW/m ³	13.600 kW/ m ³	Motor 35x menor
5 – 30%	93 – 96%	3 - 20x mais eficiente
Muitas peças móveis	Uma peça móvel	Livre de manutenção
Câmbio e transmissão complexa	Controle direto	Mais simples, leve e barato
Precisa de entrada de ar	Sem necessidade de refrigeração	<i>Design</i> mais aerodinâmico
Sem controle autônomo	Com controle autônomo	Maior facilidade no controle

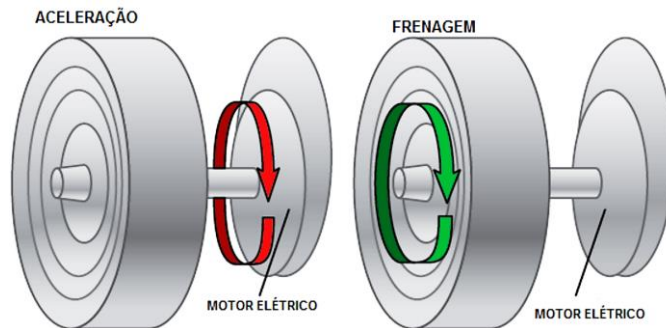
Fonte: NeoCharge, 2024.

B. Frenagem regenerativa

O sistema de frenagem regenerativa, ou *Kinetic Energy Recovery System* (KERS), também conhecido como Sistema de Recuperação de Energia Cinética (SREC), foi desenvolvido para mitigar o desperdício da energia, uma vez que a energia cinética é convertida em calor por conta do atrito entre o mecanismo de freio e o eixo em rotação e normalmente é dissipado no ar, efetivamente desperdiçando-a. Dessa forma, a frenagem regenerativa envolve um processo no qual uma parte da energia cinética do veículo é retida em um sistema de

armazenamento de curto prazo e/ou devolvida para a fonte. A Figura 11 demonstra o funcionamento deste sistema, e é possível observar que durante a aceleração, o motor transfere energia para o eixo do veículo com o freio desacoplado, ao desligar o motor e acionar o freio, a energia cinética é armazenada no sistema, ficando disponível para auxiliar a aceleração no próximo ciclo. Assim, a energia armazenada por meio desse sistema pode ser utilizada posteriormente em um processo inverso, nesse caso, sendo fornecida (EHSANI *et al.*, 2018). As vantagens e desvantagens do sistema de frenagem KERS em veículos elétricos são apresentados na Tabela 4 a seguir para uma devida comparação.

Figura 11 - Funcionamento do sistema de frenagem regenerativa.



Fonte: NeoCharge, 2024.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens da utilização do sistema KERS.

Vantagens	Desvantagens
Conserva energia do VE permitindo o seu reaproveitamento.	A tecnologia BEV que utiliza o KERS possui custos elevados se comparados com os veículos a combustão.
Aumenta a eficiência reduzindo o consumo de combustível, otimizando o uso da energia elétrica.	Desconforto do pedal para freadas mais suaves, porém o aprimoramento da tecnologia, de forma geral, vem solucionando este problema.
Preserva os componentes de freio, fornecendo maior durabilidade e menos manutenções, resultando em benefícios ambientais, já que é muito mais sustentável que os freios tradicionais, por gerar menos trocas e descartes de peças.	-
Melhora a autonomia dos VEs e o rendimento das baterias por quilômetro.	-

Fonte: NeoCharge, 2024.

2.6 SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR BATERIAS

Em aplicações com sistemas KERS, principalmente na sua implementação em veículos elétricos, o armazenamento de energia é um fator condicional, contribuindo para eficiência e autonomia de um projeto deste nível incluindo principalmente as tecnologias de baterias eletroquímicas, que são essencialmente um tipo de acumulador de energia. No sistema de armazenamento por meio de baterias, do inglês *Battery Energy Storage Systems* (BESS), o acúmulo e a liberação da energia elétrica são permitidos por meio da alternância das fases de carga-descarga, convertendo energia elétrica em energia química durante seu carregamento, ou por vias externas, e segue o caminho inverso, durante o processo de descarregamento.

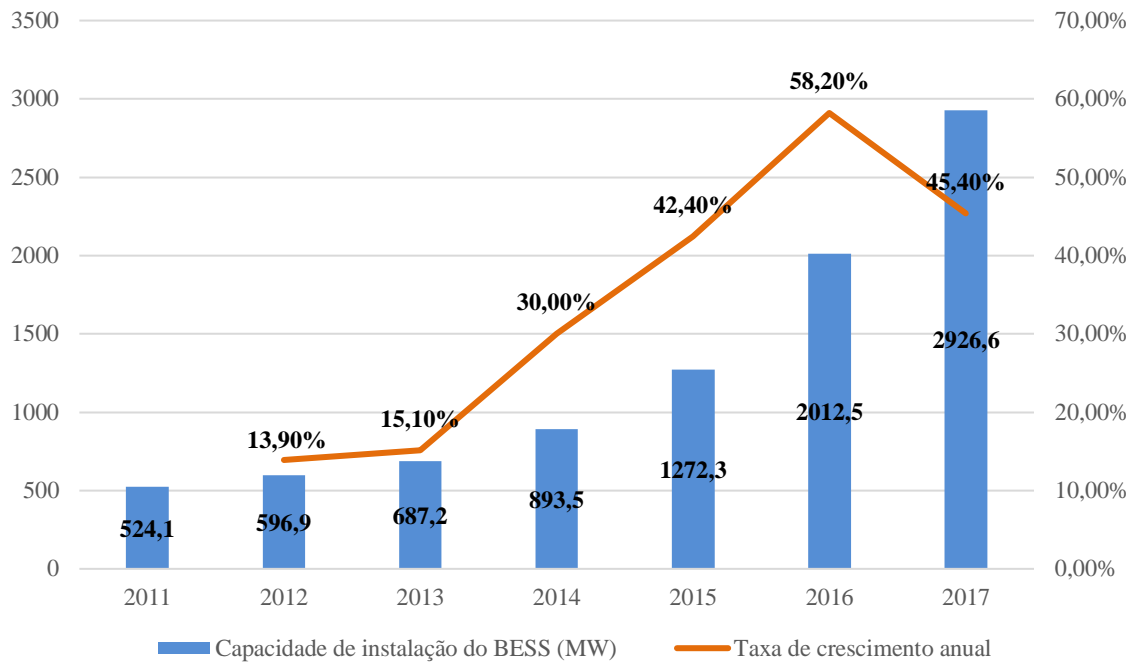
As vantagens do BESS incluem a alta densidade de energia e maturidade tecnológica, já a capacidade de energia das baterias pode ser aumentada adicionando mais *strings* (fileira de baterias conectadas em série). No entanto, uma das principais desvantagem das baterias, é que elas não são duráveis (algumas centenas a alguns milhares de ciclos) para ciclos de alta repetição, o que pode resultar em vida útil limitada para uma aplicação como uma estação de carregamento rápido para veículos elétricos. Além disso, as baterias devem ser mantidas dentro de uma faixa de temperatura operacional relativamente estreita para que não sofram uma degradação significativa no desempenho ou na expectativa de vida. As questões de descarte associados as baterias, bem como sua manutenção e custos de substituição, as tornam menos atraentes como um viável meio de armazenamento de energia para uma estação de carregamento rápido, por exemplo, (Krishna P. S., N. S. e Kedlaya, 2020) e (Ehsani *et al.*, 2018).

Para o BESS, os fabricantes de baterias especificam a mesma de acordo com a capacidade de ampères-hora, obtidos quando há descarga da bateria, a partir de um estado totalmente carregado, até que a tensão no terminal diminua para a sua tensão de corte. Dessa forma, é possível compreender que o funcionamento da capacidade das baterias pode ser distinto em diferentes taxas atuais de descarga (Ehsani *et al.*, 2018).

O BESS é um método importante para armazenar energia devido suas configurações flexíveis para diferentes requisitos de aplicações, e comparado com outros sistemas de energia, o mesmo possui uma eficiência energética relativamente maior e são opções insubstituíveis na integração centralizada e distribuída de novas energias e operações de rede auxiliares como *Smart Grids*. Seus principais indicadores técnicos, como segurança da bateria, vida útil do ciclo e densidade de energia, foram aprimorados, ao passo que os custos de aplicação caíram significativamente. E justificando tais vantagens, a escala das aplicações globais de

armazenamento de energia a baterias manteve seu rápido crescimento criando uma perspectiva otimista para a tecnologia como mostra a Figura 12 (Li e Wang, 2021).

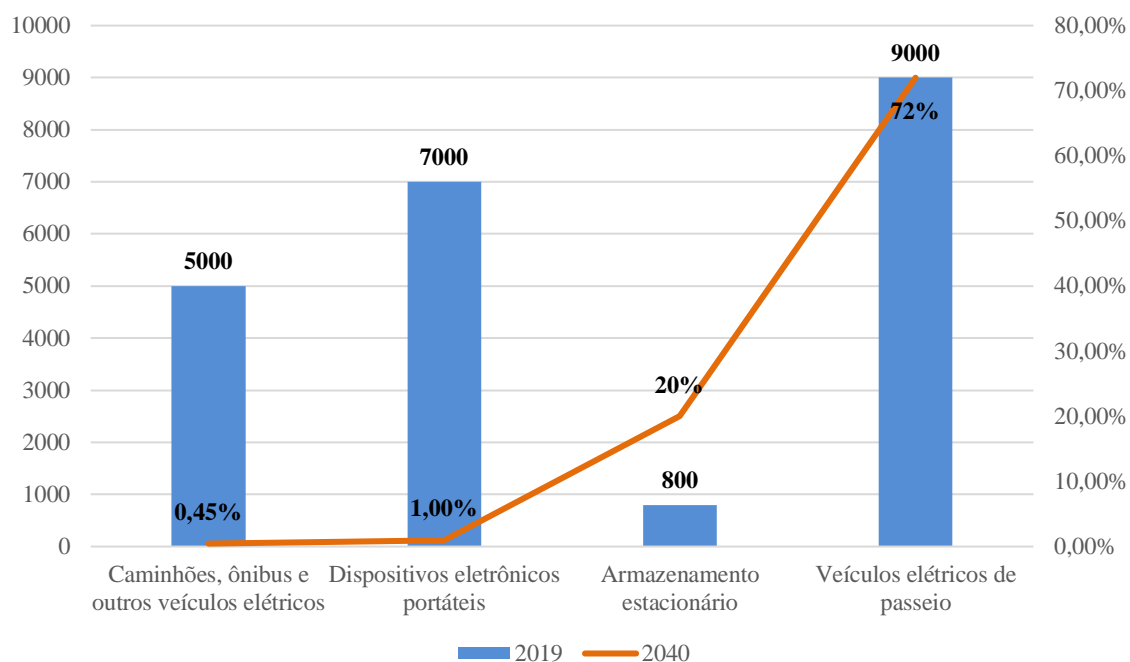
Figura 12 - Escala global do BESS nos últimos anos.



Fonte: Adaptado de Li e Wang, 2021.

De acordo com o aumento em escala global das aplicações do BESS apresentado na Figura 12, é possível expor que a disposição por baterias também será necessária para atender a demanda em todos os setores. Tal comportamento relaciona-se com a busca por flexibilidade para acomodar uma parcela maior de fontes renováveis intermitentes na matriz de geração, e a consideração de cargas atuantes nos horários de ponta, como é o caso dos veículos elétricos. O resultado é a elevação do uso do BESS, conforme apresentado na Figura 13, representando a demanda em escala nacional, em que se destaca o uso em veículos elétricos a baterias.

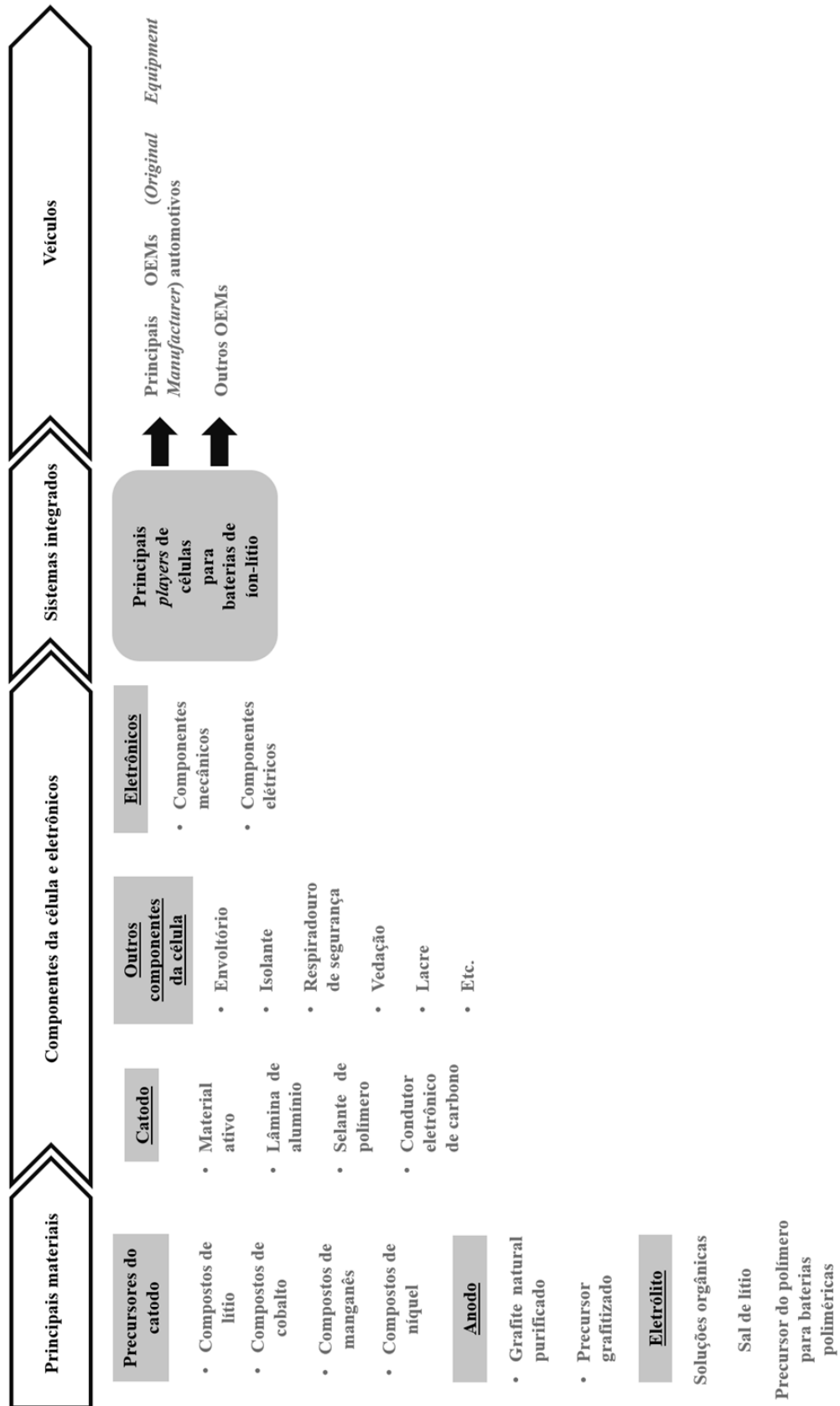
Figura 13 - Demanda atual (2019) e futura (2040, cenário de desenvolvimento sustentável) por baterias em GWh.



Fonte: Adaptado de Silva, 2021.

Conforme discutido anteriormente, o componente básico de uma bateria são as células, que por sua vez, são agrupadas em módulos e posteriormente, são agrupados em *packs* (pacotes) para serem implementados como BESS. Em geral, a arquitetura dos *packs* varia conforme o modelo do veículo, e como as células são compostas por quatro elementos principais, catodos, anodos, eletrólitos e separadores representados por seus componentes na Figura 14, em termos de custo, o principal gasto está concentrado na matéria-prima e no processamento dos *packs*, que corresponde a 39% do total. Os catodos respondem cerca de 14% do custo de uma célula, enquanto os outros três elementos, respondem por outros 14% (Castro, Barros e Veiga, 2013).

Figura 14 - Principais materiais e componentes dos *packs* de baterias.



Fonte: Castro; Barros; Veiga, 2013).

2.7 MÉTODOS PARA MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO DO BESS

Esta seção está dividida em duas análises, primeiramente serão apresentados 4 (quatro) estudos sobre modelos de estimação da energia para BEVs a fim de embasar teoricamente a metodologia do presente trabalho. Os estudos estão divididos por subseções e possuem ordem cronológica proporcionando um entendimento mais profundo sobre a evolução, tanto dos aspectos que levaram cada estudo a considerar a aplicação de seus modelos, quanto dos incrementos nas modelagens matemáticas defendidas em cada pesquisa e suas devidas considerações. Como as metodologias de dimensionamento e modelagem de BESS para VEs tem como objetivo a medição e estimação do consumo de energia dos BEVs, nos estudos destacados, o direcionamento mais geral é voltado apenas aos VEs, mas também foi observado que devido à similaridade com o sistema dos veículos no geral, há alguns detalhes e aspectos que são acrescentados para o caso da análise de BEVs, tornando-se mais evidente conforme os trabalhos são descritos. Já na segunda parte será apresentado o dimensionamento e configurações do *pack* de baterias dos veículos elétricos, e portanto, ao final desta seção, o argumento para o uso de um modelo de dimensionamento do BESS será admitido com base nestes estudos.

2.7.1 Modelos de Estimação da Energia em BEV

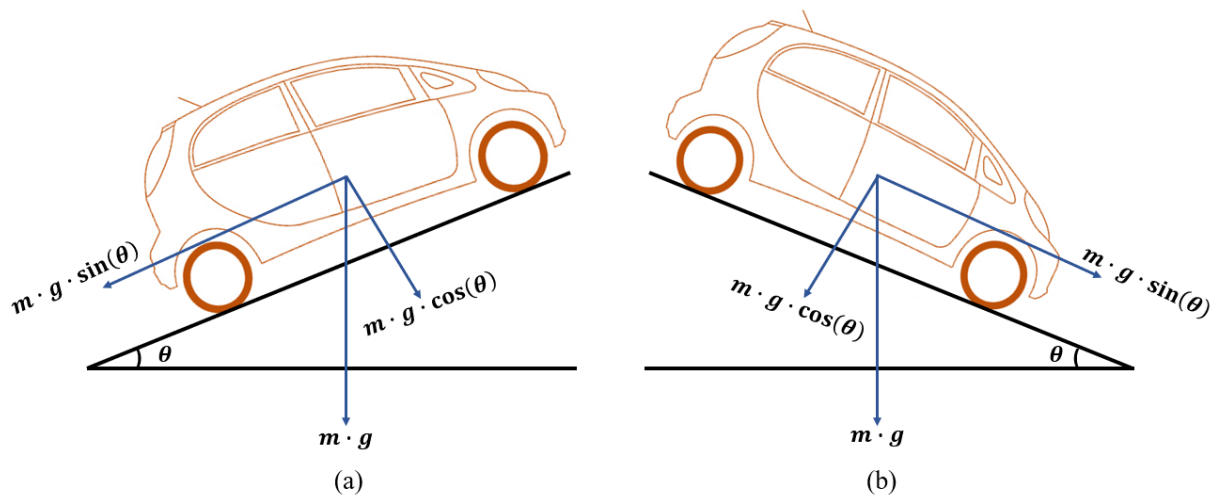
2.7.1.1 Electric vehicle's electricity consumption on a road with different slope

O trabalho de Yang (2014), envolve uma aplicação mais geral sobre a análise da energia de um veículo elétrico, e diferentemente dos trabalhos que serão apresentados mais posteriormente, o mesmo não deixa explícito que tais modelos desenvolvidos podem ser aplicados especificamente para os BEVs, deixando a entender que se trata apenas de veículos elétricos no geral. No referido artigo, os autores enfatizam que em literaturas que abordam este assunto, os modelos que podem descrever o tráfego do veículo elétrico, não necessariamente exploram as influências da inclinação da estrada no consumo de eletricidade do veículo elétrico, uma vez que, cada estrada tem a sua inclinação e muitas vezes influencia o comportamento de condução. De acordo com tais premissas, os pesquisadores afirmam que em alguns trabalhos foram propostos modelos a fim de examinar tais influências, mas não estudam mais os efeitos da inclinação da estrada no consumo de eletricidade do VE. Sendo assim, neste artigo, as

investigações são estendidas com o objetivo de investigar os efeitos da inclinação da estrada no consumo de eletricidade do veículo elétrico em diferentes estados de tráfego.

Primeiramente os autores supõem que os VEs trafegam em uma única pista de acordo com a inclinação da estrada, e como a força gravitacional afeta cada veículo no sistema de tráfego, a inclinação da estrada deve ser considerada explicitamente quando se tem o estudo acerca do comportamento de direção. A Figura 15 descreve a força gravitacional no comportamento de condução do VE na subida (a) e na descida (b) da estrada, em que θ (em graus) é o ângulo de inclinação da estrada, g (m/s^2) é a aceleração gravitacional e m (kg) é a massa do VE. Segundo o estudo, a força gravitacional apenas não afetará o comportamento da condução de direção durante seu processo de frenagem, uma vez que, este termo é compensado pela força de frenagem.

Figura 15 - Descrição das forças atuantes em veículos elétricos a) na subida e b) na descida.



Fonte: Adaptado de Asamer *et al.*, 2016.

Portanto, para estudar o comportamento de condução em estradas com diferentes inclinações, o modelo de *Optimal Velocity* (OV) ou Velocidade Ótima, foi estendido para o seguimento de carro dada pela seguinte equação:

$$\frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} = a \left\{ V(\Delta x_n) - \frac{dx_n(t)}{dt} \right\} \quad (1)$$

Em que x_n é enésima posição do VE, Δx_n é a enésima marcha do veículo, a é o coeficiente de reação do motorista e $V(\Delta x_n)$ é a velocidade ótima. Além disso, na subida e na descida, a OV pode ser definida da seguinte forma, respectivamente:

$$V(\Delta x_n) = \frac{(v_{f,max} - v_{g,u,max})[\tanh(\Delta x_n - x_{c,u}) + \tanh(x_{c,u})]}{2} \quad (2)$$

$$V(\Delta x_n) = \frac{(v_{f,max} - v_{g,d,max})[\tanh(\Delta x_n - x_{c,d}) + \tanh(x_{c,d})]}{2} \quad (3)$$

Sendo $x_{c,u}$, $x_{c,d}$, respectivamente as distâncias de segurança do veículo nas subidas e descidas, e $v_{g,u,max}$ e $v_{g,d,max}$ são os respectivos termos de ajuste resultantes da subida e descida. Além disso $v_{f,max}$ é a velocidade máxima sem a inclinação da estrada. Também foi definida pelos autores a expressão (4), em que $v_{inclinação}$ é o termo de ajuste da inclinação da estrada.

$$v_{g,u,max} = v_{g,d,max} = v_{inclinação} \cdot \sin \theta \quad (4)$$

Como a equação acima demonstra que os termos $v_{g,u,max}$ e $v_{g,d,max}$ são proporcionais à inclinação da estrada, e de acordo com o artigo, para simplificar a equação (4), foram definidos parâmetros relacionados da seguinte forma:

$$\begin{cases} v_{f,max} = 10 \\ v_{inclinação} = 1 \\ v_{g,u,max} = v_{g,d,max} = \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

Após mais algumas simplificações realizadas no artigo, é possível definir a expressão a seguir:

$$V_0(\Delta x_n) = \tanh(\Delta x_n - x(\theta)) + \tanh(x(\theta)) \quad (6)$$

Em que $x(\theta)$ é definido de acordo com a distância (metros) segura do veículo. Assim, de acordo com as discussões acima, tem-se que:

$$V(\Delta x_n) = \left(\frac{2 \pm \sin \theta}{2} \right) V_0(\Delta x_n) \quad (7)$$

Dessa forma, a equação (1) pode ser reescrita como:

$$\frac{d^2 x_n(t)}{dt^2} = a \left\{ \left(\frac{2 \pm \sin \theta}{2} \right) V_0(\Delta x_n) - \frac{dx_n(t)}{dt} \right\} \quad (8)$$

Por fim, o artigo descreve que o modelo acima pode ser usado para explorar os efeitos da inclinação da estrada no comportamento de movimento de um veículo tradicional em uma pista qualquer, mas não pode ser usado para estudar diretamente as influências da inclinação da via no consumo de eletricidade do VE. Para que o mesmo seja realizado, o modelo para explorar a potência de saída de um BEV, pode ser formulada da seguinte forma:

$$P_{b_out} = \frac{v}{\eta_{te}\eta_m} \left(\delta m \frac{dv}{dt} + mg(f + i) + \frac{\rho C_D A}{2} v^2 \right) \quad (9)$$

Em que P_{b_out} é a potência (watt) de saída da bateria do veículo elétrico, δ é o coeficiente que está relacionado com a massa do VE, m é a massa do veículo, f representa o coeficiente de resistência ao rolamento, i é o grau que considera a resistência de nivelamento, C_D é o coeficiente de arrasto aerodinâmico, a densidade do ar é caracterizada por ρ (kg/m³), A (m²) é a área frontal do veículo elétrico, e por último, η_{te} e η_m representam respectivamente a eficiência de transmissão do veículo elétrico e a eficiência do motor.

Durante o processo de frenagem, a energia de frenagem do veículo tradicional é desperdiçada, enquanto a energia de frenagem do veículo elétrico pode ser parcialmente recuperada e restaurada na bateria. No referido artigo, o estudo desse consumo de energia é reescrito para uma equação mais geral e que considera diversos fatores, como a energia consumida por certos acessórios (por exemplo, direção assistida elétrica, ar-condicionado) em que o consumo de eletricidade pode ser relativamente alto. Dessa forma, com estas particularidades adicionadas a equação (9), é possível expressá-la como:

$$P_{total} = \frac{v}{\eta_{te}\eta_m} \left(\delta m \frac{dv}{dt} + mg(f + i) + \frac{\rho C_D A}{2} v^2 \right) + P_{acessórios} \quad (10)$$

2.7.1.2 Electric vehicle's energy consumption measurement and estimation

No trabalho realizado por Wu (2015), há uma análise das relações entre a potência, a velocidade e aceleração do veículo elétrico, junto com a inclinação da pista, em que os autores também propõem um modelo analítico que estima a potência do BEV. O artigo descreve um sistema capaz de coletar dados de um veículo elétrico em uso do sistema de bateria, incluindo estado de carga, corrente, tensão, e potência do *pack* e dados de condução do veículo, incluindo velocidade, aceleração, e posição do veículo (latitude, longitude e elevação). Este VE foi construído propriamente para submeter aos testes, durante 5 (cinco) meses, com o objetivo de

analisar seu desempenho e conta com a análise de comportamento da direção do condutor do veículo. Devido as modificações realizadas no veículo de teste para explorar as análises que o artigo propôs, os autores expõem que tal feito, não diminui a significância dos resultados, caso os testes fossem realizados em BEVs atualmente produzido comercialmente. Um dos resultados desta coleta de dados, foi a análise demonstrativa de que veículos elétricos são mais eficientes ao dirigi-los em rotas urbanas do que em vias expressas. Isso se dá, pela utilização da frenagem regenerativa, fazendo com que a recarga dos BEVs seja realizada no momento do freio, o que não aconteceria em uma via ininterrupta.

O referido artigo ainda aponta sobre a importância de estimar o uso de eletricidade dos BEVs, uma vez que é um requisito importante para a melhoria futura da eficiência energética do sistema de transporte de VEs. Uma das características mais avançadas de um BEV, em comparação com veículos ICE convencionais, é sua capacidade de capturar e armazenar energia por meio do sistema de frenagem regenerativa. Conforme o diagnóstico do levantamento de dados que foram explorados pelos autores, as relações derivadas das análises entre o consumo de energia, velocidade e aceleração dos BEVs, além da inclinação da estrada forneceram uma base empírica para criação de um modelo de estimativa do consumo de energia dos veículos elétricos.

À medida que as investigações foram realizadas, os autores atentam para o desafio do uso direto de distribuições para estimar a potência instantânea e o consumo de energia dos BEVs, em parte porque essas distribuições têm variações relativamente grandes que podem gerar erros de estimativa, e devido à demora de implementação do método, além de ser computacionalmente caro em termos de coleta de dados e análise, dessa forma, um modelo analítico de estimativa de energia é proposto.

É relatado que de acordo com análises de dados do próprio artigo, e com a teoria fundamental da dinâmica veicular, sabe-se que a potência instantânea de um BEV é determinada pela velocidade do veículo, aceleração e inclinação da pista. Portanto, o modelo proposto é essencialmente uma descrição analítica da relação entre potência, velocidade, aceleração e inclinação dos BEVs. Assim, conforme a física básica, o esforço de tração necessário para a condução de um veículo elétrico, em certas condições, é determinado por três resistências principais, conforme descrito pela equação (11).

$$F = ma + R_a + R_{rl} + R_g \quad (11)$$

O esforço de tração é representado pela força F (N), m simboliza a massa do veículo (kg), a é a aceleração (m/s^2), e por último, R_a , R_{rl} e R_g caracteriza respectivamente a resistência aerodinâmica, de rolamento e resistência de inclinação (N). Dado que a velocidade do veículo é v (m/s), e a inclinação da estrada é θ (graus), R_a , R_{rl} e R_g podem ser calculados pela seguinte equação:

$$\begin{cases} R_a = kv^2 = \frac{\rho}{2} C_D A_f v^2 \\ R_{rl} = f_{rl} mg \\ R_g = mg \sin \theta \end{cases} \quad (12)$$

Em que k é a constante de resistência aerodinâmica, determinada pela densidade do ar ρ , a área frontal do veículo é representada por A_f (m^2) e o coeficiente de arrasto por C_D , f_{rl} é a constante de resistência ao rolamento, e g é a aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$). Combinando as equações (11) e (12), o resultado é apresentado na expressão (13), e inteirando que a mesma pode ser aplicada tanto para veículos ICEs quanto para BEVs.

$$F = ma + kv^2 + f_{rl} mg + mg \sin \theta \quad (13)$$

Logo, para gerar força de tração, a potência necessária P_o (watt) para um veículo viajando na velocidade v , pode ser estimada usando a seguinte equação:

$$P_o = F \cdot v = (ma + kv^2 + f_{rl} mg + mg \sin \theta) \cdot v \quad (14)$$

Como P_o é a potência de saída fornecida pela potência de entrada P , e para VEs a potência de entrada é gerada por um motor elétrico, se assumir que a eficiência do motor é η , tem-se a seguinte relação entre P e P_o :

$$P_o = \eta \cdot P \quad (15)$$

O artigo considera que ignorando a eletricidade usada para controle climático e demais acessórios do veículo, a perda de energia elétrica tem maior concentração sobre a perda de cobre para a região de alta corrente em caso de motor CC, ou perda de ferro, para motor CA. Em geral, as perdas de potência podem ser descritas como um produto do quadrado da corrente I (amperes) pela resistência R (Ω) do condutor. Assim, a eficiência do motor η pode ser calculada por:

$$\eta = (P - I^2R)/P \quad (16)$$

Das equações (14), (15) e (16) a potência dos VEs pode ser estimada por:

$$P = I^2R + F \cdot v \quad (17)$$

Da mesma forma, é possível descrever também, a força F gerada pelo torque do motor, como um produto da constante de armadura K_a , fluxo magnético Φ (weber) e corrente I , conforme a equação (18).

$$F = \frac{\tau}{R_p} = \frac{K_a \cdot \Phi \cdot I}{R_p} \quad (18)$$

Assim, o τ representa o torque (Nm) e o R_p (metros) caracteriza o raio do pneu. Uma observação é feita para motores CC e CA, visto que o fluxo magnético é diferente. Para um motor CC, tal fluxo é do entreferro do eixo direto por polo, já para um motor CA ele é o valor eficaz do fluxo de entreferro do eixo direto por polo. Portanto, para simplificar a equação (18), é definido que $K = K_a \Phi$, logo, a força pode ser reescrita como:

$$F = \frac{K \cdot I}{R_p} \quad (19)$$

Por último, utilizando as equações (13), (17) e (19), a potência instantânea de um BEV pode ser estimada como:

$$P = \frac{R \cdot R_p}{K^2} (ma + kv^2 + f_{rl}mg + mg \sin \theta)^2 + v(kv^2 + f_{rl}mg + mg \sin \theta) + mav \quad (20)$$

Em termos apenas das potências é possível realizar uma simplificação acerca da equação (20) da seguinte forma:

$$P = \underbrace{\frac{R \cdot R_p}{K^2} (ma + kv^2 + f_{rl}mg + mg \sin \theta)^2}_{P_m} + \underbrace{v(kv^2 + f_{rl}mg + mg \sin \theta)}_{P_t} + \underbrace{mav}_{P_g} \quad (21)$$

Sendo, as perdas de potência pelo motor caracterizada por P_m , P_t representando as perdas de potência devido à resistência de deslocamento e P_g como a possível energia adquirida

pela aceleração ou desaceleração do VE. Os resultados, segundo os autores, além de confirmarem que os BEVs são mais eficientes do que os veículos ICEs devido as perdas de energia elétrica para um motor elétrico serem pequenas, utilizando o veículo de teste, o modelo proposto também foi capaz de estimar com sucesso a potência instantânea do VE e o consumo de energia de viagem. Tal modelo é desenvolvido com base em teorias muito fundamentais da física e obtida semelhantemente a outras ideias expostas nas literaturas apontadas pelo referido artigo. Os autores ainda destacam a importância e o propósito de desenvolver um modelo analítico simples que funciona em aplicações de tempo real, diferente de outros modelos que levam em conta muitos fatores, dificultando sua utilização em tais aplicações.

2.7.1.3 Sensitivity analysis for energy demand estimation of electric vehicles

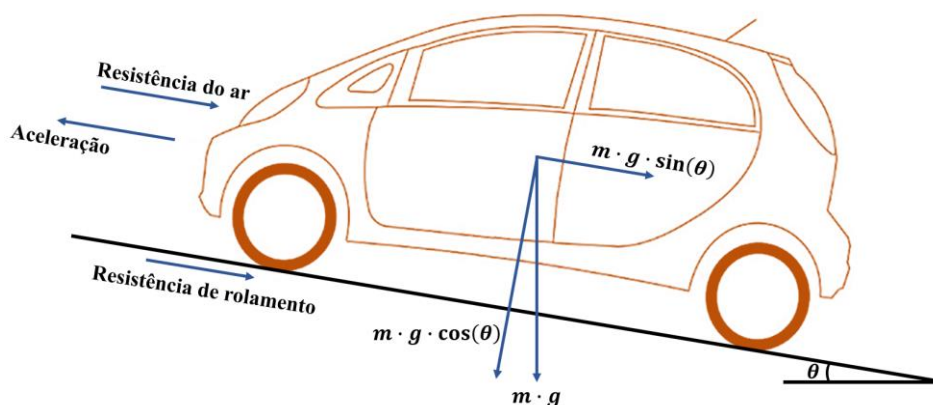
No trabalho de Asamer (2016), uma análise de sensibilidade para um modelo mecânico é apresentada para estimar a demanda energética de BEVs, que segundo os próprios autores, o modelo proposto apesar de ser visto com frequência na literatura, há parâmetros regularmente escolhidos de forma imprudente, que por consequência invalida essas estimativas de demanda de energia. Em reconhecimento sobre tal problema, o artigo fornece uma nova priorização de parâmetros e quantificação de seu impacto na precisão da estimativa de demanda de energia, permitindo uma adequada tomada de decisão durante a fase de seleção de parâmetros do modelo. A base de dados e sua análise é fundamentada em trilhas de GPS do inglês *Global Positioning System*, gravadas de um BEV sob várias condições de condução, contudo, os resultados são igualmente aplicáveis para outros BEVs, tornando este estudo ainda mais relevante. Diante do exposto, o artigo busca fornecer, orientações para a implementação e calibração de uma estimativa de demanda de energia baseada em um modelo de dinâmica longitudinal.

Este estudo, introduz a problemática do BESS devido à pequena capacidade de armazenamento de energia das baterias, sendo necessário saber quanta energia é consumida pelo BEV, estimando sua máxima autonomia. Da mesma forma que descrito em ambos os trabalhos anteriores, neste, os autores também abordam sobre um modelo que descreve o comportamento do veículo com base nos princípios gerais da mecânica sendo frequentemente utilizado para estimar a demanda de energia elétrica. A diferença está na consideração apenas na dinâmica longitudinal do modelo, ou *Longitudinal Dynamics Model* (LDM) por descrever o comportamento do movimento de um VE ao longo de sua direção longitudinal. Um LDM possui diversos parâmetros que se relacionam com as propriedades do veículo e seu ambiente,

estes por sua vez, estão sujeitos a incertezas dentro de um determinado intervalo, causando uma variação na estimativa do consumo de energia. Diante disso, é possível analisar tal problema explorando sobre quais das incertezas dos parâmetros do modelo têm maior influência na precisão da estimativa do consumo de energia e, portanto, necessitando de configurações mais detalhadas.

Segue-se que, o movimento de um veículo ao longo de sua direção de movimento é determinado por todas as forças que atuam sobre ele nessa mesma direção, podendo ser vistas na Figura 16 para um veículo em movimento ascendente (subida). O arrasto do ar, a resistência ao rolamento e a inclinação são as forças externas. O esforço de tração para superar essas forças e acelerar deve ser fornecido pelo motor elétrico.

Figura 16 - Forças que atuam sob o veículo no movimento ascendente.



Fonte: Adaptado de Aamer *et al.*, 2016.

Assim, são descritas a relação entre forças externas, aceleração e consumo básico de energia. Uma vez que o veículo está em movimento, as resistências externas estão tentando pará-lo. De acordo com a segunda lei de Newton, a relação entre forças e aceleração pode ser escrita como:

$$F_T = \frac{dv}{dt} \cdot f \cdot m + F_R \quad (22)$$

A força de tração é caracterizada por F_T fornecida pelo motor elétrico, e F_R são as forças de resistências mencionadas que atuam no veículo. A massa total do veículo é representada por m , e f é o fator de massa de todas as partes rotativas. Para ser maior que as forças de resistência

e acelerar com $\frac{dv}{dt}$, o motor deve fornecer força de tração. A composição das resistências é descrita como mostra a equação (23).

$$F_R = \underbrace{m \cdot g \cdot \sin(\theta)}_{\text{Gradientes da estrada}} + \underbrace{m \cdot g \cdot \cos(\theta) \cdot f_r}_{\text{Resistência de rolamento}} + \underbrace{\frac{\rho \cdot C_D \cdot A}{2}}_{\text{Ar}} v^2 \quad (23)$$

Em que g é a aceleração gravitacional, θ simboliza a inclinação da estrada, e f_r é o coeficiente de atrito de rolamento. Pode-se perceber que o arrasto do ar é influenciado pelo quadrado da velocidade v , da densidade do ar ρ , da área de superfície dianteira do veículo A e do coeficiente aerodinâmico C_D . Dessa forma, como a potência necessária para a condução é a força de tração vezes a velocidade do veículo, e a potência mecânica é fornecida pelo motor elétrico (extraindo energia elétrica da bateria), sendo considerada as taxas de eficiência, a potência elétrica extraída da bateria pode ser definida como:

$$P_o = \frac{F_T \cdot v}{\eta_M} + P_{\text{acessórios}} \quad (24)$$

Assim a eficiência energética da transmissão, do motor e da conversão de energia é representada por η_M . Pode-se perceber que componentes auxiliares do carro como os acessórios (aquecedor ou ar-condicionado), estão causando uma demanda adicional de energia elétrica, denotada como $P_{\text{acessórios}}$. Durante a desaceleração ou em descidas, a F_T pode ser negativa, transmitindo energia de volta para a bateria, neste caso, o motor está agindo como um gerador (P_i). Para estimar a demanda total de energia elétrica de uma viagem, todas as entradas e saídas elétricas devem ser resumidas de acordo com a expressão (25):

$$E = \int_0^T P_{el} \cdot dt \quad (25)$$

Sendo T o tempo de duração da viagem. A potência tanto para fornecer quanto para recuperar é definida como:

$$P_{el} = \begin{cases} P_o, & F_T \geq 0 \\ P_i, & F_T < 0 \end{cases} \quad (26)$$

Para estimar o consumo de energia de uma trajetória, a integral da equação (25) é substituída pela soma sobre todos os elementos da trajetória. Assim a equação (25) é reescrita como:

$$E = \sum_{i=1}^N P_{el,i} \cdot \Delta t \quad (27)$$

Em que Δt o intervalo de tempo entre dois locais da trajetória e N é o seu comprimento. $P_{el,i}$ representa a potência elétrica estimada em cada passo de tempo i de acordo com a equação (27).

O artigo conclui algumas coisas interessantes para o decorrer deste trabalho de conclusão as quais compensam comentários, o primeiro é que, foram analisados que independentemente do perfil de elevação, os parâmetros mais importantes são a eficiência de direção, o coeficiente de atrito de rolamento e a demanda de energia auxiliar (para velocidades abaixo de 80 km/h). Por outro lado, a densidade do ar é relevante apenas para altas velocidades (maiores que 100 km/h) e a massa total apenas para viagens em subida e em ambientes montanhosos. Finalmente, a eficiência (recuperação) é relevante apenas para descidas.

Além disso, conforme discutido nos trabalhos anteriores em que ambos analisam o comportamento do condutor, neste artigo, tal comportamento não é considerado com detalhes. Esta circunstância destaca então o segundo comentário, que é o descarte do comportamento do condutor do veículo, sendo justificada pois o único efeito relevante de condução pode ser argumentado para o consumo de energia auxiliar, visto que tal parâmetro ganha importância para tempos de viagem maiores, em que há diferentes velocidades a serem consideradas.

O último comentário, destacado a partir da conclusão realizada pelos autores, é que este modelo pode ser utilizado para aplicar qualquer tipo de estimativa de demanda de energia veicular. E oferece suporte na decisão de quais fatores do modelo devem ser configurados para indicar possibilidades de redução do consumo de energia, por exemplo, dirigindo nem muito rápido nem muito lento.

2.7.1.4 A Survey on the Electric Vehicle Routing Problem: Variants and Solution Approaches

Em Erdelic (2019), tem-se uma revisão dos modelos recentes de consumo de energia que podem ser usados em modelos de roteamento de BEVs. A justificativa deste estudo segue o padrão dos discutidos anteriormente nesta mesma seção, que devido à baixa energia específica

da bateria, o consumo de energia deve ser estimado com precisão para atingir a autonomia máxima de um BEV e reduzir os custos gerais de roteamento.

Ademais, este estudo possui um embasamento bastante significativo, pois em uma de suas literaturas apresentadas, mais de 40 (quarenta) BEVs globalmente disponíveis, categorizados em carros pequenos, médios, grandes, de alto desempenho e esportivos, foram analisados. Todos os modelos BEVs utilizam baterias à base de lítio, especialmente lítio-íon com capacidade de bateria variando entre 12-90 kWh, e com distâncias dentro das faixas de 85-528 km. A autonomia no processo de entrega de carga, é menor em veículos BEVs do que ICE em razão da bateria ter energia específica menor, em veículos leves por exemplo (130 Wh/kg), do que o óleo fóssil (1233 Wh/kg). As próprias baterias montadas em BEVs são a principal causa de altos custos de aquisição e limitações técnicas, devido a degradação ao longo do tempo, resultando em diminuição da capacidade máxima. O referido artigo dispõe desta análise para incrementar uma outra conclusão importante: a bateria deve ser substituída após cinco a dez anos ou após 1.000 a 2.000 ciclos com grandes variações de estado de carga. Há outros fatores que também influenciam essa degradação das baterias como, sobrecarga, descarga excessiva, altas e baixas temperaturas, alto SoC durante o armazenamento, grande profundidade de descarga, entre outros.

Segundo os autores, na literatura disponível, o consumo de energia é frequentemente estimado usando o LDM, e semelhantemente aos equacionamentos desenvolvidos em (12) e (23), na expressão (28), a força f é acrescentada pela representação da força de inércia das peças rotativas do veículo (até 5% da massa total do veículo). Sendo assim, se $F \geq 0$, o veículo está acelerando e é necessário energia para o movimento do BEV (modo motor), caso contrário, se $F < 0$, o veículo está em desaceleração (frenagem), ou uma condução em declive esteja ocorrendo, nesse caso a energia é devolvida à bateria do BEV, pois o motor elétrico tem a capacidade de devolver a energia (modo de recuperação), podendo-se devolver até 15% da energia totalmente consumida.

$$F = \underbrace{m \cdot g \cdot \sin(\theta)}_{\text{Gradientes da estrada}} + \underbrace{m \cdot g \cdot \cos(\theta) \cdot f_r}_{\text{Resistência de rolamento}} + \underbrace{\frac{\rho \cdot C_D \cdot A}{2}}_{Ar} v^2 + \underbrace{f \cdot m \cdot a}_{\text{Aceleração}} \quad (28)$$

Como em condições da vida real, as velocidades nas estradas dependem do tempo e podem ser descritas como o perfil de velocidade ao longo do período observado, o mesmo depende do tipo de estrada, do comportamento do condutor, tráfego (acidentes, congestionamentos), e condições meteorológicas, e isso determina vários de parâmetros que

dificultam a previsão do consumo de energia de um BEV em diferentes cenários de tráfego. Assim, o estudo aponta que uma das formas de considerar tais parâmetros, é a utilização de modelagens baseadas em dados para prever este consumo. Como exemplificação, um desses modelos aplica a Regressão Linear Múltipla (RLM) à dados de BEV medidos no mundo real, considerando sete características: distância, velocidade, energia consumida pelos dispositivos auxiliares, elevação positiva, elevação negativa, temperatura e variação de energia cinética por unidade de distância.

Ainda, de acordo com o referido artigo, a energia elétrica fornecida pela bateria é dividida em dois tipos de energia: a auxiliar (acessórios de ventilação, luzes) representada por $P_{acessórios}$ e energia mecânica dada pela força (F) vezes a velocidade (v). Dessa forma, a energia da bateria P_b pode ser calculada por (29), em que μ_e é a razão de conversão de energia química na bateria para energia elétrica, μ_m é o coeficiente de transmissão entre o motor elétrico e o trem de força e μ_g é a razão de conversão de energia mecânica sobre rodas para energia química armazenada na bateria. A energia é devolvida à bateria somente se a força for menor que zero e a velocidade for maior que o valor determinado experimentalmente.

$$P_b = \begin{cases} \mu_e(\mu_m \cdot F \cdot v + P_{acessórios}), & F \geq 0 \\ \begin{cases} 0, & v < v_{min} \\ (\mu_g \cdot F \cdot v + P_o), & \text{caso contrário} \end{cases} & F < 0 \end{cases} \quad (29)$$

Em resumo, os estudos se mostraram capazes de abordar individualmente descrições e modelagens de energia em veículos elétricos, e em alguns casos, estendendo-se para modelos em aplicações de BEVs, sendo de grande interesse para este trabalho. É perceptível que a maioria das equações expostas nos trabalhos possuem bastante similaridade com o método geral de descrição de forças, potências e energia em VEs, demonstrado no primeiro estudo citado. Apesar das abordagens obviamente possuírem diferenças quando há consideração de um parâmetro ou outro, em todos eles, os resultados são satisfatórios para as devidas condições impostas, e as justificativas para o descarte de algum parâmetro é coesa e compreensível. Esses argumentos fortalecem a utilização de tais modelos para descrever e dimensionar a potência de um BEV para a aplicação na metodologia deste estudo.

Em estudos ainda mais recentes, é possível encontrar este modelo de descrição de forças para VEs, como exposto no trabalho de Tsharaktschiew (2022), em que a técnica que relaciona o consumo de eletricidade por quilômetro (km) para a velocidade de condução, derivada por meio da fundamental teoria da dinâmica do veículo (Lei de Newton), segue as expressões

definidas para a equação (28), expressando a força necessária para superar a resistência (externa) e para acelerar o veículo elétrico.

2.8 DIMENSIONAMENTO DO *PACK* DE BATERIAS DO VEÍCULO ELÉTRICO

À medida que essa tecnologia está se tornando madura, os desafios se apresentam em como as baterias podem ser mais baratas, mais eficientes, menores e mais leves. Com vários fenômenos físicos ocorrendo simultaneamente dentro da bateria, que são afetados pelo ambiente em que ela opera, é difícil englobar todos eles na fase de projeto. O dimensionamento adequado de uma bateria requer conhecimento em diversos domínios técnicos específicos, e para sua otimização, a abordagem usual a fim de melhorar um ou mais aspectos do projeto, incluem questões térmicas, custo, desempenho ou mecânica (Pelletier *et al.*, 2020).

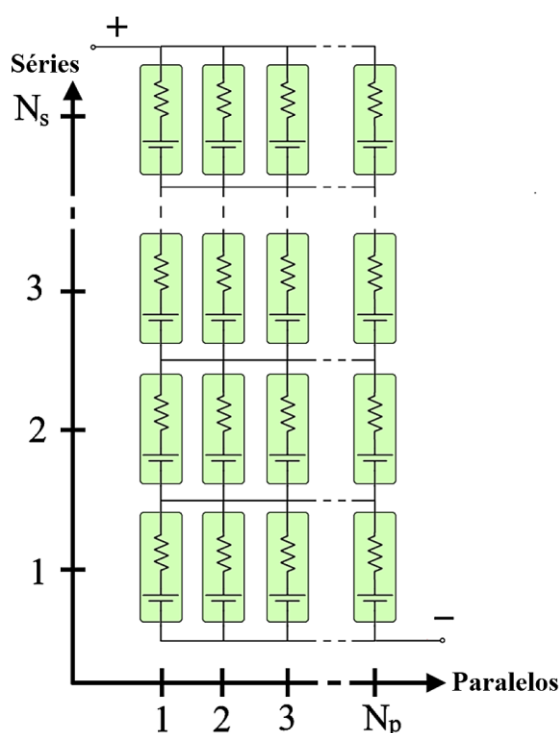
O autor expõe algumas dificuldades em relação aos métodos computacionais devido a muitas variáveis inter-relacionadas envolvidas, pois mesmo os softwares sendo capazes de projetar baterias, a rotina computacional com tempo de simulação pode chegar em torno de dias, algo difícil de levar em consideração quando o objetivo é a otimização do próprio processo, já outros softwares são difíceis de serem implementados necessitando de treinamento e domínio no mesmo. Sendo assim, uma saída interessante para trazer agilidade e resultados satisfatórios está na maneira de dimensionar uma bateria usando a configuração série-paralelo, exibindo a configuração resultante de forma simples utilizando o número de células em série e em paralelo como eixos do gráfico, por exemplo.

Uma das vantagens desta metodologia é ser aplicável a qualquer tipo de bateria de células de íon-lítio, e uma vez que os parâmetros do ciclo de condução e os requisitos da bateria sejam conhecidos, qualquer veículo pode ser avaliado. A abordagem de Pelletier (2020) também está presente em seus trabalhos anteriores, em Pelletier (2019) e Lebel (2019), e em ambos, as baterias de íons de lítio são destacadas como a principal tecnologia para VEs, se tornando o centro da atual evolução tecnológica devido sua densidade de energia cada vez maior. No entanto, para a densidade específica dessa tecnologia se tornar maior que a da gasolina, isso configura duas tendências para a indústria automotiva: ou há o aumento da capacidade das células, nesse caso, construindo células maiores ou, é feito o agrupamento de muitas células menores.

Para compreender qual das duas opções é mais adequada, entende-se que por questões segurança, confiabilidade e qualidade geral do produto, agrupar um número de células menores, se torna mais vantajoso. Uma outra justificativa é percebendo que, caso o sistema de

armazenamento seja muito grande, dependendo até do veículo que se escolha, o lugar tenderá a ficar muito apertado, e até irregular. Portanto, juntar pequenas células, na maioria das vezes, se configura com a única opção viável para aplicações de volume limitado, como de um VE. As especificações do *pack* de baterias podem ser adaptadas aos requisitos específicos do VE por conexão em série ou paralelo, conforme mostrado na Figura 17, sendo comumente aceito que o comportamento de volume de um *pack* será igual à soma dos desempenhos das células individuais (PELLETIER *et al.*, 2019).

Figura 17 - Configuração de células em série e paralelo.



Fonte: Pelletier *et al.*, 2019.

As demandas de potência e energia do *pack* de baterias dependem do desempenho e alcance a serem obtidos com o veículo elétrico, essas características do sistema podem ser elaboradas por cálculos analíticos, demonstrados na seção anterior, por meio da aquisição de dados de um produto similar ao VE ou via modelos. Para VEs, o requisito mínimo de energia da bateria é a potência máxima necessária para o sistema de propulsão elétrica, ou seja, a potência mecânica ao volante, mais as perdas (Pelletier *et al.*, 2019). Sendo assim, a seguir estão comentadas as equações para o dimensionamento do *pack* de baterias de VEs segundo o referido autor, em termos do número de células em paralelo (N_p) e em série (N_s).

A. Volume

O volume é uma característica que precisa ser minimizada devido ao espaço limitado disponível dentro do VE, e para estimar o volume do pacote $V_{ol,bat}$, as variáveis necessárias são a taxa de preenchimento f_r , o diâmetro da célula D_{cel} , o comprimento da célula L_{cel} e o intervalo distância entre células d_{gap} , como expresso em:

$$V_{ol,bat} = N_s \cdot N_p \cdot L_{cel} \cdot f_r \cdot \left(\frac{\pi(D_{cel} + d_{gap})^2}{4} \right) \quad (30)$$

B. Peso

Nos veículos elétricos, a bateria representa quase metade do peso total e é expresso por (31), sendo calculado como a soma do peso das células m_{cel} e o peso da mudança de fase térmica do material m_{ftm} , que é dada pela equação (32) para uma determinada densidade específica ρ :

$$m_{bat} = N_s N_p (m_{cel} + m_{ftm}) \quad (31)$$

$$m_{ftm} = \rho \cdot L_{cel} \left(f_r \frac{\pi(D_{cel} + d_{gap})^2}{4} - \frac{\pi(D_{cel})^2}{4} \right) \quad (32)$$

C. Corrente

A corrente máxima da célula $I_{cel,máx}$ é mais frequentemente fornecida por fabricantes de células como uma taxa de descarga e podem ser calculadas como mostra a equação (33) em que V_{cel} é a tensão da célula de bateria.

$$I_{cel,máx} = \frac{P_{veículo}}{N_s \cdot N_p \cdot V_{cel}} \quad (33)$$

D. Tensão

Os limites de tensão BESS podem ser definidos por considerações técnicas, como a tensão de operação do motor ou definidos por normas e regulamentos. A Tensão máxima da bateria

$V_{bat,m\acute{a}x}$, muitas vezes é definida por razões de segurança ou preocupações técnicas e é expressa conforme a equação (34), igualmente exposta no trabalhos de Rade (2018):

$$V_{bat,m\acute{a}x} = N_s \cdot V_{cel,m\acute{a}x} \quad (34)$$

E. Potência

A potência de descarga P_{bat} , precisa ser maior ou igual à demanda máxima de potência do veículo $P_{veículo}$, e para evitar limitar a potência do veículo durante a operação normal, a potência disponível da bateria deve permanecer maior do que $P_{veículo}$ mesmo com SoC baixo. A equação que expressa a potência da bateria depende da potência máxima da célula $P_{cel,m\acute{a}x}$.

$$P_{bat} = N_s \cdot N_p \cdot P_{cel,m\acute{a}x} \quad (35)$$

F. Energia

A energia total necessária pelo veículo é o produto do consumo médio de energia por quilômetro (km) e o alcance do alvo do VE. A energia contida na bateria E_{bat} é definida como a soma da energia armazenada em cada célula, e é diretamente proporcional ao número total de células, ou seja, N_s e N_p , a mesma, depende da tensão nominal das células $V_{cel,nom}$ e da capacidade nominal da tecnologia $Q_{cel,nom}$.

$$E_{bat} = N_s \cdot N_p \cdot V_{cel,nom} \cdot Q_{cel,nom} \quad (36)$$

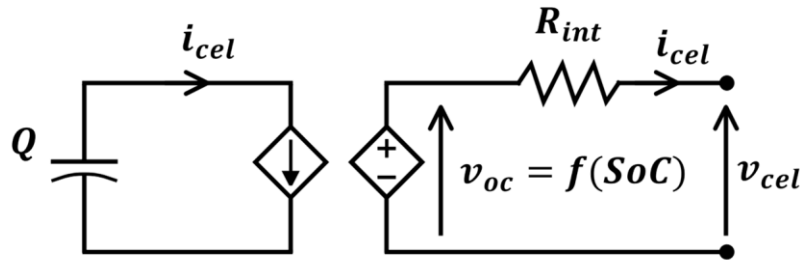
Este método pretende ser genérico o suficiente para qualquer tipo de problema de dimensionamento de BESS. Em um trabalho mais atual do autor referido acima, a ideia principal está sendo estabelecer restrições em certos parâmetros, visto que os mesmos podem assumir muitos valores. Dessa forma, o objetivo é encontrar quais são as possíveis combinações de valores para essas variáveis onde elas respeitarão todas as restrições, assim, o espaço de busca pode ser minimizado apenas para as soluções possíveis. O método facilita e acelera o processo, e configura uma flexibilidade não disponível com outros métodos. Dependendo do resultado, os domínios podem ser modificados para serem menores ou maiores, as variáveis

podem ser alteradas ou as restrições removidas para explorar outras partes do espaço de busca (Pelletier *et al.*, 2020).

Uma outra forma de dimensionar o BESS é por meio da análise do circuito do módulo de uma bateria, conforme a Figura 18, sendo um modelo representado por um resistor interno R_{int} que é conectado em série com um capacitor de densidade de energia muito alta que tem capacidade Q . Para cada célula da bateria, o modelo pode ser deduzido de seu circuito equivalente conforme a equação (37), em que, v_{oc} é a tensão de circuito aberto, do inglês *Open Circuit* (OC), da célula da bateria em função do estado de carga (SoC), v_{cel} e i_{cel} denotam a tensão de saída e a corrente de cada célula, respectivamente (Vo-duy; Trov; Jeme, 2022).

$$\begin{cases} v_{cel} = v_{oc}(SoC) - i_{cel}R_{int} \\ SoC = 1 - \frac{1}{3600 \cdot Q} \int i_{cel} \cdot dt \end{cases} \quad (37)$$

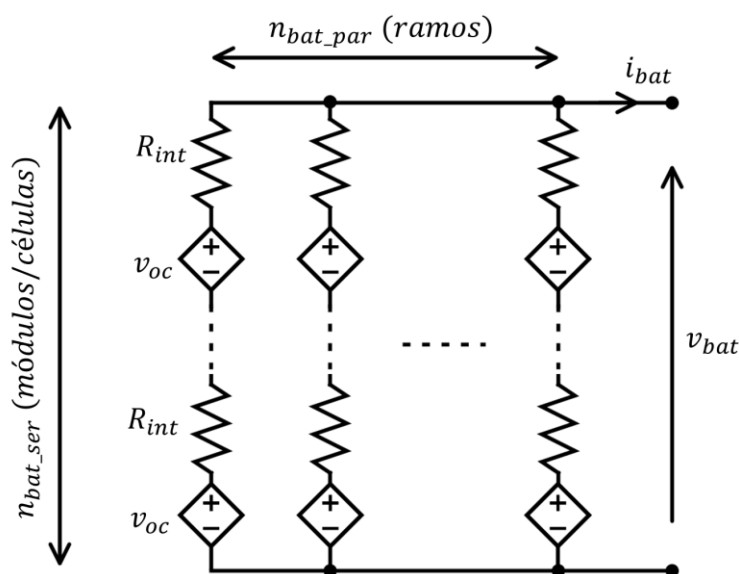
Figura 18 - Circuito equivalente do módulo/células de baterias.



Fonte: Vo-duy; Trov; Jeme, 2022.

Para dimensionar uma bateria para o VE, pode-se gerar combinações de células, conectando-as em uma determinada configuração. Seguindo o padrão de definição, N_s representa o número de células de bateria que são conectados em série e N_p para número de ramos paralelos conforme exposto na Figura 19. Assim, o compartilhamento de energia entre células dentro o pacote pode ser escrito pela equação (37), em que, v_{bat} é a tensão de saída e i_{bat} representa a corrente total de entrada/saída da bateria (VO-DUY; TROV; JEME, 2022).

$$\begin{cases} v_{bat} = N_s v_{cel} \\ i_{cel} = \frac{1}{N_p} i_{bat} \end{cases} \quad (38)$$

Figura 19 - Circuito equivalente do *pack* de baterias.

Fonte: Vo-duy; Trov; Jeme, 2022.

2.9 SELEÇÃO DA CÉLULA DE BATERIA A PARTIR DO DIMENSIONAMENTO DO BESS

Realizar a seleção de um sistema de armazenamento de energia que se adeque as condições impostas para um determinado projeto, pode se tornar um problema devido a grande quantidade de modelos de células disponíveis com suas devidas especificidades, fazendo com que o projeto possa ser atendido por uma única ou mais tecnologia. A escolha por um modelo de célula, e conseqüentemente do dimensionamento do Sistema de Armazenamento de Energia, ou *Energy Storage System* (ESS) para uma aplicação específica, depende de vários fatores como, por exemplo, profundidade de descarga, capacidade, preço, composição química, entre outros. Assim, a seleção de um modelo adequado passa a envolver objetivos que não podem ser todos atendidos por uma única célula, fazendo-se necessário considerar possíveis compensações entre os potenciais benefícios e desvantagens de diferentes modelos.

Em um estudo realizado por Baumann (2019), este problema é abordado aplicando-se a Análise de Decisão Multicritério, do inglês *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA), ele é considerado uma ferramenta para apoiar tomadores de decisões na organização diante das informações disponíveis, considerando as conseqüências das alternativas e explorando suas necessidades, sendo as decisões e preferências expressas na forma de equações, insumos e coeficientes, que podem ser observados e reproduzidos. Este estudo fornece argumentos aprofundados da literatura MCDA existente, que estão relacionados a tecnologias de

armazenamento de energia para apoio a tomada de decisão, e promove uma orientação robusta para a condução da MCDA para seleção de tecnologia ESS.

Os métodos MCDA são separados em *Multi-Objective Decision Making*, ou Tomada de Decisão Multiobjetivo (MODM) e *Multi-Attribute Decision Making*, ou Tomada de Decisão Multiatributo (MADM), em que ambas compartilham características semelhantes. O método MODM trata de problemas de decisão em que o espaço de decisão é contínuo, buscando encontrar um espaço de solução ótimo dentro de limites predefinidos, já o MADM, é utilizado para classificar alternativas de um conjunto finito de alternativas de decisão discretos com base nas comparações entre critérios (BAUMANN *et al.*, 2019). Como neste trabalho, os modelos das células de baterias representam amostras finitas, e suas especificidades de fábrica representam um conjunto de alternativas predeterminadas, as mesmas se encaixam como problemas de espaços discretos, diante deste argumento, o presente trabalho resume a abordagem apenas para o método MADM, que de maneira geral, será resumido como MCDA, sem a necessidade de especificar o método MADM.

Ainda segundo Baumann (2019), o MCDA pode ser esquematizado em duas fases, ambas são consideradas sobrepostas e não podem ser separadas nitidamente uma da outra, que podem ser subdivididas da seguinte forma:

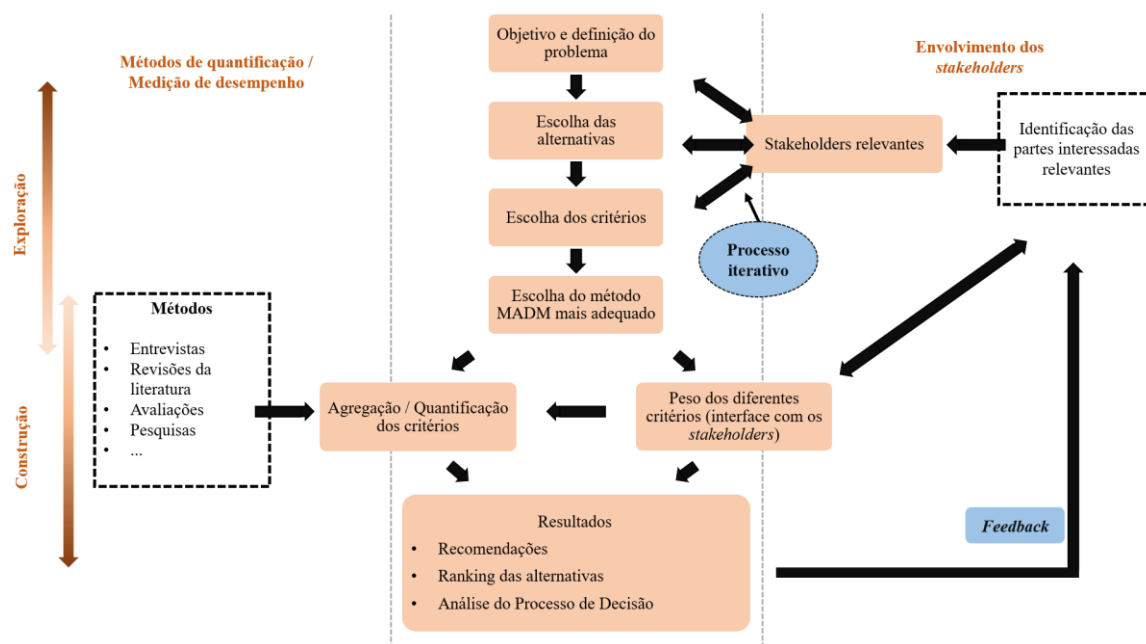
- **Fase de construção:** nesta fase há a definição de objetivos, escopos e alternativas, identificação e seleção de critérios, e por último, a criação de interface de *stakeholders*, ou partes interessadas no projeto.
- **Fase de exploração:** nesta fase, tem-se a medição de desempenho de critérios, agregação de critérios MADM e a comparação de resultados.

O esquema deste procedimento com ambas as fases para o método MCDA geral é exposto na Figura 20, em que a fase de construção começa com a definição do objetivo e do problema de decisão que o estudo tenta resolver, incluindo a seleção do método MADM mais adequado, a escolha das alternativas relevantes, além da definição dos critérios de avaliação e do fornecimento de uma interface (por exemplo, comparações pareadas) que permite aos tomadores de decisão expressar suas preferências em relação aos critérios selecionados. Geralmente, tais etapas são conduzidas em conjunto com decisores relevantes por meio de pesquisas ou entrevistas, e isso torna evidente a importância da identificação de *stakeholders*

relevantes nesse processo, uma vez que fornecem avaliações críticas durante a estruturação de um MCDA.

Na fase de exploração, os pesos são idealmente fornecidos pelos decisores, e o desempenho das diferentes alternativas relativas aos critérios definidos necessita ser medido e comparado com as demais alternativas. Esta etapa é frequentemente chamada de agregação de critérios e existem vários métodos disponíveis para este fim, entre eles o mais adequado deve ser escolhido de acordo com o objetivo e definição do problema. As entradas dos dados podem ser cedidas de revisões de literatura ou pesquisas, e os resultados são apresentados em um ranking de alternativas, cujas informações devem ser fornecidas de forma compreensível como *feedback* para os tomadores de decisão.

Figura 20 - Esquema simplificado do MCDA.



Fonte: Adaptado de Baumann *et al.*, 2019.

O MADM pode ser distinto em três tipos de métodos: os Métodos Elementares, Métodos Compensatórios Clássicos, ou *Classic Compensatory Methods* (CCM), também chamados de Métodos de Teoria da Utilidade Multiatributos (escola americana) e os Métodos de Superação (ou Sobreposição), do inglês *Outranking Methods* (OM - escola europeia). A seguir, os métodos serão discutidos de acordo com suas respectivas utilidades, vantagens e desvantagens (Baumann *et al.*, 2019), (Brookes; VILAS, 2015) e (Margrethe *et al.*, 2015).

A. Métodos Elementares

Os métodos elementares possuem abordagens mais simplificadas não necessitando de determinações de pesos e, embora considerem os problemas de uma perspectiva multicritério, a ordenação das alternativas é construída com base no desempenho de um ou alguns critérios. Tais métodos incluem meios de informação não preferencial sem tomador de decisão (por exemplo, análise de prós e contras, métodos conjuntivos e disjuntivos, métodos lexicográficos) e diferem de métodos compensatórios, pois o critério principal não pode ser superado por combinações de outros critérios, por exemplo, ao usar métodos lexicográficos, um critério é escolhido como mais importante do que todos os outros e a disposição inicial é baseada nesse critério primário, já a disposição subsequente depende de um critério secundário, e assim por diante, até que todas as alternativas tenham sido separadas e ordenadas. Uma grande vantagem desses métodos é sua simplicidade usando uma abordagem descritiva para a tomada de decisão, e esforços mínimos de cálculo, por outro lado, não consideram potenciais inconsistências de pesos atribuídos a diferentes critérios.

B. Métodos Compensatórios Clássicos (CCM)

Os Métodos de Função de Valor, ou Compensatórios Clássicos da escola americana de MCDA, atribuem funções de utilidade/valor e pesos para calcular um valor geral de alternativas, em que os pesos representam constantes de escala, tornando as escalas de critérios comparáveis. O valor total é a soma dos valores marginais que cada critério atribui a uma ação considerada e é conhecido como um único critério de síntese. Os métodos CCM oferecem um lançamento total de determinadas alternativas, e os modelos típicos encontrados na literatura são: TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*), MAVT (*Multi-Attribute Value Theory*), SMART (*Simple Multi-Attribute Rating Technique*) e AHP (*Analytic Hierarchy Process*), sendo este último encontrado mais frequentemente na literatura. O nível de agregação dos pesos dentro da escola americana de MCDA pode-se considerar uma desvantagem devido à perda de informação, uma vez que os decisores podem contribuir para uma compensação absoluta entre as diferentes avaliações, assim, um bom desempenho para um critério pode ser facilmente contrabalançado por outro ruim, tornando a escolha de uma alternativa não ótima que pode ter um bom desempenho em um critério específico, mas ruim nos demais. Além disso, em situações de decisão do mundo real, é necessário lidar com imprecisões devido aos sentimentos humanos (por exemplo, como

as pessoas podem interpretar “igualmente” versus “fortemente” dentro de uma etapa de avaliação), e isso torna o fornecimento de valores numéricos exatos mais complicado.

C. Método da Superação (OM)

A abordagem do Método da Superação, que remete a escola europeia de MCDA, procura eliminar alternativas que são particularmente dominantes, nesse caso, a avaliação das alternativas é baseada em provas construídas a partir da combinação de desempenho entre critérios e importância dos critérios. Para qualquer relação, os critérios podem ser divididos em um arranjo concordante que apoia a afirmação e um arranjo discordante que se opõe a ela, dessa forma, a principal diferença entre os métodos de superação é como a concordância e a discordância são medidas e agregadas para produzir uma classificação final. Os métodos típicos são: ELECTRE I, II e III (*Elimination and Choice Expressing Reality*) e PROMETHEE I&II (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations*). Os métodos de superação são predominantemente descritivos, sendo considerados como uma extensão mais sofisticada dos métodos elementares, pois avaliam as preferências dos tomadores de decisão para atribuir pesos aos critérios, refletindo heurísticas mais complexas.

A maioria dos métodos MADM apresentam alta flexibilidade em relação à entrada, permitindo integrar uma grande variedade de tipologias de dados com vários graus de liberdade em uma avaliação, e como cada método MADM tem seus prós e contras, torna-se um desafio selecionar o mais adequado, sendo assim, é recomendado a utilização de possíveis combinações de diferentes métodos, uma vez que, alguns métodos são mais orientados para agregação de desempenho e outros para agregação de preferência.

Segundo Baumann (2019) e Ren (2018), a agregação desses critérios é realizada principalmente por meio do Processo Analítico Hierárquico (AHP) em combinação com um amplo conjunto de outros métodos, sendo o AHP o método mais utilizado para determinação de pesos na tomada de decisão multicritério na seleção das tecnologias alternativas de armazenamento de energia. Contudo, de forma geral, os trabalhos encontrados que abordam o AHP, estão direcionados a avaliações das formas de armazenamento de energia que incluem a tecnologia eletroquímica, sendo utilizados para determinar a estrutura hierárquica e o peso do índice de avaliação, conforme exposto em (WEI *et al.*, 2016), (REN, 2018) e (C. LIMA *et al.*, 2020), e para o conhecimento na atual pesquisa bibliográfica, não foram encontradas revisões ou aplicações de tais métodos no contexto de decisão/escolha de células de baterias voltadas a veículos elétricos.

Diante do exposto acima, a escolha da análise e seleção das células de baterias por meio dos métodos MCDA se dá pela percepção, bem como comprovação científica dos trabalhos referenciados, que o mesmo é capaz de agregar todas as características que são consideradas importantes, inclusive as não quantitativas, em processos relacionados a problemas de tomada de decisão. Sendo assim, o descarte da necessidade de decisores e julgamentos paritários, retiram o fator humano durante todo o desempenho da decisão, tornando o sistema mais exato. Desta forma, as seções a seguir expõem os dois métodos a serem trabalhados neste trabalho, o método AHP-Gaussiano e o método AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson, assim como suas particularidades e diferenças, e discute o embasamento de tais métodos com relação ao método AHP.

2.10 MÉTODO AHP

Proposto por Saaty (1980), o método AHP é uma metodologia multicritério que visa selecionar ou escolher as melhores alternativas por meio de um processo que considera diferentes critérios de avaliação. O método permite a comparação de ambos os critérios quantitativos e qualitativos, em que o problema de decisão é estruturado dentro de uma hierarquia: no topo está o general objetivo, seguido dos critérios que podem ser decompostos em subcritérios, e por fim, na parte inferior estão as alternativas. Dentro do AHP, as partes interessadas atribuem uma preferência individual a cada critério por comparações aos pares (Baumann *et al.*, 2019) e (Santos; Araújo; Gomes, 2021).

O AHP é uma das ferramentas de tomada de decisão mais conhecidas e difundidas, além de ser desenvolvida para construir modelos de decisão e estabelecer prioridades relativas a um conjunto finito de alternativas. As comparações são feitas usando uma escala de julgamentos absolutos (1, 3, 5, 9) tendo como base a Escala Fundamental de Saaty conforme mostra a Tabela 5, bem como valores intermediários (2, 4, 6, 8) entre os dois julgamentos que representam a medida relativa de uma alternativa sobre outra, quando são relacionadas com determinado critério (Lima *et al.*, 2020) e (Santos; Araújo; Gomes, 2021). De acordo com o referido autor, as principais etapas do método AHP incluem:

1. Definição do objetivo, critérios de decisão e alternativas;
2. Desenvolvimento de uma matriz de comparação pareada. Ao fazer critérios e alternativas julgamentos, o especialista compara aos pares os elementos no nível de hierarquia para cada um dos elementos do nível superior da hierarquia;

3. Desenvolvimento de uma matriz normalizada, ou Matriz de Decisão (MD);
4. Desenvolvimento de um vetor prioritário;
5. Cálculo do índice de consistência.

Tabela 5 - Escala Fundamental de Saaty.

Grau de importância	Definição	Explicação
1	Igual importância	Ambos os critérios contribuem igualmente para atingir o objetivo
3	Importância moderada	A comparação favorece ligeiramente um critério em relação ao outro
5	Forte importância	A comparação favorece fortemente um critério em relação ao outro
7	Importância muito forte	A comparação favorece muito fortemente um critério em relação ao outro
9	Importância absoluta	A comparação favorece de forma absoluta um critério em relação ao outro
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários entre os níveis de comparação	Quando se procura uma condição intermediária entre dois níveis consecutivos
Recíprocos	(1/n) em que “n” é o peso atribuído a determinado critério	Suposição lógica

Fonte: Lima *et al.*, 2020.

Mesmo quando julgamentos são obtidos de especialistas, alguma inconsistência pode ocorrer, e uma maneira de realizar a medição do grau de inconsistência em uma matriz de julgamentos de pares é avaliar como o valor próprio mais alto desta matriz se desvia da ordem da matriz. O Índice de Consistência (IC) pode ser calculado conforme mostrado pela expressão (39), em que $\lambda_{máx}$ representa o maior autovalor da matriz e n o número de critérios da matriz, sendo assim, o IC deve ser menor do que 100% para que a comparação apresentada na matriz seja considerada consistente.

$$IC = \frac{|\lambda_{máx} - n|}{n - 1} \quad (39)$$

6. Desenvolvimento de uma matriz de prioridades;

Após as etapas 2 a 5 terem sido executadas para cada critério, os resultados da etapa 4 são resumidas em uma matriz de prioridades listando as alternativas de decisão verticalmente e os critérios horizontalmente. As entradas da coluna são os vetores de prioridade para cada critério.

7. Desenvolvimento de uma matriz de desenvolvimento de critérios par a par;
8. Desenvolvimento de um vetor prioritário global;

Multiplicando o vetor de prioridade dos critérios (da etapa 7) pela matriz de prioridade (da etapa 6), que pode então ser usado para determinar a classificação geral das alternativas (etapa 8).

9. Escolher a alternativa de acordo com a classificação mais alta.

2.11 MÉTODO AHP-GAUSSIANO

Proposto por Santos *et al.*, (2021), trata-se de uma nova abordagem do método AHP, em que a análise de sensibilidade é por meio do Fator Gaussiano, obtendo-se o peso dos critérios diretamente da Matriz Decisão (MD). As etapas deste método se assemelham até o primeiro passo do método anterior, em que já estão definidas as alternativas e critérios. Posteriormente, os seguintes passos são seguidos:

1. Estabelecer a matriz de decisão normalizada;
2. Calcular a média das alternativas;
3. Calcular o desvio padrão dos critérios com base na amostra das alternativas;
4. Calcular o fator gaussiano para cada critério;
5. Normalização do Fator Gaussiano;
6. Ponderação da matriz de decisão;
7. Soma das ponderações;
8. Obtenção do novo ranking.

2.12 MÉTODO AHP-GAUSSIANO COM CORRELAÇÃO DE PEARSON

Proposto por Gomes *et al.*, (2021), também se trata de uma nova abordagem do método AHP, em que nesse caso, a análise de sensibilidade é por meio do Fator Gaussiano e do Coeficiente de Correlação de Pearson, obtendo-se o peso dos critérios diretamente da Matriz Decisão (MD).

1. Estabelecer a matriz de decisão normalizada;
2. Calcular a média das alternativas;
3. Calcular o desvio padrão dos critérios com base na amostra das alternativas;
4. Calcular o fator gaussiano para cada critério;
5. Normalização do Fator Gaussiano;
6. Cálculo do módulo da Correlação de Pearson entre os critérios;
7. Cálculo da média de Pearson por critério;
8. Cálculo do Fator de Correlação por critério;
9. Cálculo do novo peso;
10. Ponderação da matriz de decisão;
11. Soma das ponderações;
12. Obtenção do ranking.

Segundo Gomes *et al.*, (2021) e Santos *et al.*, (2021), o método AHP tradicional gera pequenas discriminação entre alternativas, indicando a necessidade de uma análise de sensibilidade mais cuidadosa, dessa forma, tanto o AHP-Gaussiano quanto o AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson, tratam desse tipo de discriminação, além disso, em ambas conclusões, estão destacadas a facilidade, confiabilidade e rapidez de aplicação dos métodos, sem a necessidade de aplicar comparações pareadas entre as alternativas e critérios, descartando possíveis imprecisões.

Diante dos argumentos relatados, este trabalho utilizará o método AHP-Gaussiano e AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson para tratar das tomadas de decisões acerca da topologia e característica da célula de bateria que melhor se adequar ao VE. A escolha de tais métodos se baseia na retirada do julgamento paritário e de decisões humanas que podem interferir nos resultados, embora as mesmas sejam realizadas por meio pesquisas ou entrevistas com especialistas da área. Não obstante, os métodos escolhidos permanecem fundamentados de acordo com uma das ferramentas mais poderosas de tomada de decisão para multicritérios,

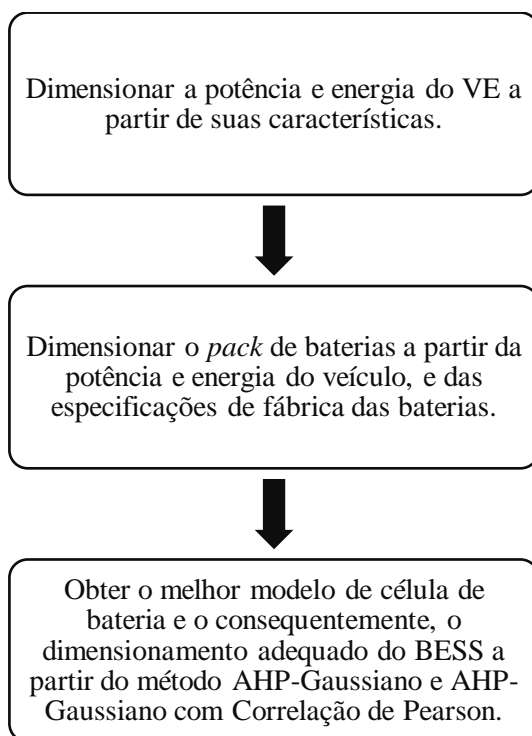
que é o método AHP, logo, torna-se uma análise que exprime resultados mais seguros e confiáveis, e que apesar de não terem sido encontrados na literatura para especificamente a aplicação com sistemas de armazenamento para VE, o AHP-Gaussiano e AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson apresentam-se como métodos simplificados e de rápidas respostas quando se trata de tomada de decisão.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo, tem-se a demonstração detalhada e a proposição do método para dimensionar o sistema de armazenamento para o veículo elétrico do tipo fórmula, bem como escolher o modelo de célula de baterias que se adeque ao BESS dimensionado. O método foi diretamente realizado no Microsoft Excel® pela facilidade na manipulação para vários tipos e quantidade de dados, e pela análise estatística durante todo o processo. Para melhor compreensão do leitor, um diagrama é exposto na Figura 21, contendo as definições das atividades executadas, e conforme comentado, todo dimensionamento exposto neste capítulo será baseado nos estudos detalhados no capítulo anterior.

O diagrama inicia com o cálculo da energia e potência de um VE de acordo com as especificidades do veículo e da trajetória percorrida pelo mesmo, tornando-se evidente que, os valores levantados providenciam os valores para a definição do *pack* de baterias, tanto a respeito de sua configuração série/paralelo, quanto os valores de corrente e potência máxima das células, destacada como a segunda abordagem do dimensionamento. Na sequência do diagrama, e como última etapa, diante das dimensões do BESS para cada célula obtidos nas etapas anteriores, os métodos AHP-Gaussiano e AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson são utilizados para definir uma célula dentre todos os modelos, e para validação do método escolhido.

Figura 21 - Diagrama da metodologia.



Fonte: A autora, 2024.

3.1 CARACTERÍSTICAS DO VEÍCULO ELÉTRICO

Após ciência das etapas acima, a metodologia do dimensionamento do BESS para o VE se inicia com o cálculo dos valores para a força, potência e energia do veículo, que devem ser obtidos a partir das características fornecidas. No caso deste trabalho de conclusão, as informações são do VE do tipo Fórmula SAE (*Society of Automotive Engineers*) conforme mostra a Figura 22, disponibilizado pela equipe da EVolt Racing da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA), que faz parte da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

A equipe é composta por estudantes dos cursos de Engenharia Elétrica, Eletrônica, Mecânica e de Materiais da UACSA-UFRPE, e tem como objetivo principal promover a pesquisa, o desenvolvimento e a inovação tecnológica no campo da mobilidade elétrica além de incentivar o interesse pela tecnologia entre os estudantes universitários e a comunidade local, por meio da criação do protótipo de VE com tecnologia desenvolvida regionalmente, destinado a competir na Fórmula SAE. As características do VE são expostas na Tabela 6, e o mesmo está sendo desenvolvido para participar de uma competição estudantil de engenharia entre universidades, cujo objeto é percorrer um circuito oval de 22 km em cerca de 35 minutos.

Figura 22 - Veículo do tipo fórmula utilizado.



Fonte: RACING; EVolt, 2024.

Tabela 6 - Características do veículo.

Parâmetros	Valores
C_D	0,7
ρ	1,2
A	1,128
f_r	0,013
m	275 kg
V_{inv}	76 V

Fonte: RACING; EVolt, 2024.

3.2 DIMENSIONAMENTO DO BESS

Para realizar o dimensionamento da potência a partir das características do veículo, foi utilizada a equação (28), com as seguintes considerações: o ângulo de inclinação da pista será julgado como de 0° , por ser uma trajetória que não possui pontos da pista com relevantes valores angulares, além disso, foi descartada a razão de conversão de energia química na bateria para energia elétrica e o coeficiente de transmissão entre o motor elétrico. Por fim, a potência mecânica do VE foi calculada de acordo com a equação (29), e com este resultado, é possível dimensionar a energia do veículo consequentemente.

Para o dimensionamento do *pack* de baterias, de acordo com a equação (34) e com a respectiva Tabela 7, acerca das informações disponíveis da bateria, é possível encontrar o número das células em série (N_s), e por consequência, calcular o número de células em paralelo

(N_p), conforme equação (36). A partir destes dois importantes fatores, calcula-se a corrente máxima da célula ($I_{cel,m\acute{a}x}$) bem como sua potência máxima ($P_{cel,m\acute{a}x}$), respectivamente determinados por meio equação (33) e equação (36).

Após os cálculos acima, deve-se partir para a segunda etapa proposta pelo diagrama, sendo este o dimensionamento do *pack* de baterias, que será feito em relação a quantidade de células em série e paralelo, tais cálculos são realizados automaticamente, quando fornecidas as especificidades das células de bateria. Para este trabalho, em relação aos modelos das células, foram disponibilizados 1.158 (mil cento e cinquenta e oito) exemplares de um determinado fabricante, na qual suas principais especificidades para alcançar o objetivo do desenvolvimento do veículo estão expressas na Tabela 7, com os 5 (cinco) primeiros e os 5 (cinco) últimos valores dos modelos expostos.

Tabela 7 - Especificidades das células disponibilizadas.

Modelo	Taxa Máxima de Descarga Contínua (C)	Tensão Nominal (V)	Tensão de Carregamento (V)	Capacidade (mAh)	Corrente Máxima de Descarga das Guias (A)
SLPB7725030	15	3,70	4,20	450	16
SLPB4328045	20	3,70	4,20	450	48
SLPB4428045	20	3,70	4,20	450	48
SLPB4430048	15	3,70	4,20	480	48
SLPB6216054	25	3,70	4,20	450	32
...
SLPB7859098	10	3,70	4,20	5300	96
SLPB8742126	20	3,70	4,20	5200	96
SLPB6945150	30	3,70	4,20	4600	120
SLPB8045135	30	3,70	4,20	4500	120
SLPB8743128	35	3,70	4,20	4300	120

(continua)

Tabela 7 - Especificidades das células disponibilizadas.

Modelo	Corrente Máxima de Descarga das Guias (A)	Peso (g)	Dimensões das Células (mm)			Material das Células
			Comprimento	Largura	Altura	
SLPB7725030	16	10,0	31	25,00	7,40	LCO
SLPB4328045	48	10,4	45,5	28,50	4,10	LCO
SLPB4428045	48	10,4	45,5	28,50	4,20	LCO
SLPB4430048	48	10,5	49,5	30,00	3,90	LCO
SLPB6216054	32	10,5	56	16,00	6,00	LCO
...
SLPB7859098	96	99,0	99	58,50	7,50	LCO
SLPB8742126	96	99,0	127,5	42,00	8,40	LCO
SLPB6945150	120	99,5	150	45,00	6,70	LCO
SLPB8045135	120	99,5	135	45,00	7,70	LCO
SLPB8743128	120	99,5	128	43,00	8,40	LCO

(conclusão)

Fonte: RACING; EVolt, 2024.

3.3 DEFINIÇÃO DA TECNOLOGIA DE BATERIA

Para finalizar a terceira etapa do diagrama da metodologia proposta, são organizados no formato de matriz os critérios a serem comparados (incluindo a própria quantidade de células em série e em paralelo) e os tipos de células disponibilizados (o trabalho inclui o modelo do A1 até o A1158), a configuração da matriz deve ter a apresentação dos critérios em linha e os modelos das células em coluna, essa matriz formada é então denominada “Matriz de Decisão” ou MD. Diante dos argumentos discutidos e expostos anteriormente, a partir do dimensionamento do BESS e de todas as especificidades relevantes para este trabalho, a MD na qual serão aplicados os métodos AHP-Gaussiano e AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson, ou apenas AHP-Gaussiano Pearson, para seleção de um modelo da célula de bateria,

representará os onze critérios escolhidos para desenvolvimento e suas alternativas, que se resumem aos modelos disponibilizados pelo fabricante A, em que novamente, apenas os cinco primeiros e últimos valores destes modelos estão sendo expostos nesta seção. Com a normalização desta matriz, aplica-se o método MCDA para a tomada de decisão, e define-se um método para disponibilização do *ranking* comparando cada modelo das células com os critérios escolhidos. Para uma melhor visualização, os critérios foram renomeados para todo o documento a partir desta seção, e estarão identificados da seguinte forma:

C1 → Taxa Máxima de Descarga Contínua (C);	C6 → Volume das Células (ml);
C2 → Tensão Nominal (V);	C7 → Peso (g);
C3 → Tensão de Carregamento (V);	C8 → Quantidade de Células em Série;
C4 → Capacidade (mAh);	C9 → Quantidade de Células em Paralelo;
C5 → Corrente Máxima de Descarga das Guias (A);	C10 → Corrente Máxima das Células (A);
	C11 → Potência Máxima das Células (W).

Com o método AHP-Gaussiano, basta calcular a partir da matriz de decisão normalizada, a média das amostras (neste trabalho será 1/1.158), o desvio padrão de todas as amostras dos modelos das células para cada um dos critérios (por exemplo, o desvio padrão da amostra A1 até A1158 em relação ao critério da tensão nominal, e assim por diante), o fator gaussiano (o desvio padrão dividido pela média das amostras), e a normalização do fator gaussiano será o novo peso das amostras, definindo o *ranking* do método AHP-Gaussiano.

Para o método AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson, é realizada uma matriz de critério vs critério utilizando a análise de correlação de Pearson, permitindo quantificar a capacidade do relacionamento entre as variáveis (critérios), a partir disso tem-se a média dos valores para cada linha (ou para cada critério), exemplo, se a quantidade de critérios escolhida for 3 (três), a matriz da análise de Pearson será uma matriz 3x3 (três por três), e a média será contabilizada para cada linha. Com o resultado do fator gaussiano do método AHP-Gaussiano, juntamente com a média dos critérios, é aplicado um fator de correção que será 1 menos a média, e o resultado será multiplicado pelo fator gaussiano, dessa forma, para gerar o novo peso, o fator de correção é normalizado e aplicado à matriz de decisão normalizada, definindo o *ranking* do método AHP-Gaussiano Pearson.

4 IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados em detalhes os resultados decorrentes da simulação conduzida de acordo com a metodologia proposta. A fim de dimensionar adequadamente o sistema de armazenamento de energia (BESS) destinado ao veículo elétrico objeto deste estudo, foi empregada a ferramenta do Excel, e portando, ao examinar tais resultados, será possível compreender a viabilidade da abordagem proposta em relação a escolha de tecnologia de bateria adequada para o dimensionamento do VE tipo fórmula.

Sendo assim, de posse dos valores da Tabela 7, e analisando de acordo com as suposições expostas anteriormente, a força total exercida pelo veículo atinge os 88,40 N, resultando em uma potência mecânica estimada para o VE de 926,12 kW. Como consequência direta desse cálculo, a energia demandada pelo veículo elétrico totaliza 540,236 kWh, conforme evidenciado na Tabela 8. Por fim, a Tabela 8 ainda oferece uma visão sobre o dimensionamento do *pack* de baterias, calculando-se a quantidade de células em série e em paralelo. É importante notar que esses cálculos são realizados de forma automática, com base nas especificações fornecidas das células de bateria.

Tabela 8 - Dimensionamento do BESS e do *pack* de baterias.

Informações do Veículo		Informações do <i>Pack</i> de Baterias	
Massa total do veículo (kg)	275	Tensão máxima da bateria (V)	76
Aceleração gravitacional (m/s ²)	9,8	Tensão máxima da célula (V)	*
Inclinação da estrada (°)	0	Cálculo de Células em Série	
Área da superfície dianteira do veículo (m ²)	1,128		**
Coefficiente aerodinâmico	0,7	Energia do veículo (Wh)	540,236
Distância a ser percorrida (m)	22000	Tensão máxima da célula (V)	*
Tempo estimado da distância a ser percorrida (s)	2100	Capacidade de corrente (mAh)	*
Coefficiente de atrito de rolamento ..	0,013	Cálculo de Células em Paralelo	
Fator de massa	1		**
Tensão de entrada do inversor (V) ..	76		
Cálculo da Força (N)			
	88,40		
Cálculo da Potência (W)			
	926,12		
Energia do Veículo (Wh)			
	540,236		

* Recebe os valores do banco de dados do fabricante

** Realiza o cálculo automático a partir do valor fornecido por *

Fonte: A autora, 2024.

No prosseguimento da análise, a matriz de decisão ou MD que será submetida aos métodos AHP-Gaussiano e AHP-Gaussiano Pearson para os 11 (onze) critérios definidos é apresentada na Tabela 9, aqui os critérios são dispostos nas linhas, enquanto os modelos das células são representados nas colunas. Como discutido anteriormente, para dar continuidade às etapas dos métodos, a matriz de decisão foi normalizada, garantindo uma avaliação equitativa dos valores, essa matriz normalizada encontra-se detalhada na Tabela 10, em que a normalização foi feita dividindo um valor da amostra pelo total da soma de todos os valores das amostras para cada coluna, ou cada critério.

Tabela 9 - Matriz de decisão formada com as especificidades das baterias.

Modelo	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	15	3,70	4,20	450	16	5,735
A2	20	3,70	4,20	450	48	5,317
A3	20	3,70	4,20	450	48	5,446
A4	15	3,70	4,20	480	48	5,792
A5	25	3,70	4,20	450	32	5,376
...
A1154	10	3,70	4,20	5300	96	43,436
A1155	20	3,70	4,20	5200	96	44,982
A1156	30	3,70	4,20	4600	120	45,225
A1157	30	3,70	4,20	4500	120	46,778
A1158	35	3,70	4,20	4300	120	46,234

Modelo	C7	C8	C9	C10	C11
A1	10,0	21	15	0,45	1,665
A2	10,4	21	15	0,45	1,665
A3	10,4	21	15	0,45	1,665
A4	10,5	21	14	0,48	1,776
A5	10,5	21	15	0,45	1,665
...
A1154	99,0	21	1	5,3	19,61
A1155	99,0	21	1	5,2	19,24
A1156	99,5	21	2	4,6	17,02
A1157	99,5	21	2	4,5	16,65
A1158	99,5	21	2	4,3	15,91

Fonte A autora, 2024.

Tabela 10 - Matriz de decisão normalizada.

Modelo	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	0,00073	0,00087	0,00087	0,00007	0,00014	0,00010
A2	0,00097	0,00087	0,00087	0,00007	0,00043	0,00010
A3	0,00097	0,00087	0,00087	0,00007	0,00043	0,00010
A4	0,00073	0,00087	0,00087	0,00008	0,00043	0,00011
A5	0,00121	0,00087	0,00087	0,00007	0,00029	0,00010
...
A1154	0,00048	0,00087	0,00087	0,00084	0,00087	0,00079
A1155	0,00097	0,00087	0,00087	0,00082	0,00087	0,00082
A1156	0,00145	0,00087	0,00087	0,00073	0,00108	0,00082
A1157	0,00145	0,00087	0,00087	0,00071	0,00108	0,00085
A1158	0,00170	0,00087	0,00087	0,00068	0,00108	0,00084

Modelo	C7	C8	C9	C10	C11
A1	0,00008	0,00086	0,00340	0,00007	0,00007
A2	0,00008	0,00086	0,00340	0,00007	0,00007
A3	0,00008	0,00086	0,00340	0,00007	0,00007
A4	0,00008	0,00086	0,00317	0,00008	0,00008
A5	0,00008	0,00086	0,00340	0,00007	0,00007
...
A1154	0,00075	0,00086	0,00023	0,00084	0,00084
A1155	0,00075	0,00086	0,00023	0,00082	0,00082
A1156	0,00076	0,00086	0,00045	0,00073	0,00073
A1157	0,00076	0,00086	0,00045	0,00071	0,00071
A1158	0,00076	0,00086	0,00045	0,00068	0,00068

Fonte A autora, 2024.

Com a aplicação do método AHP-Gaussiano a partir da matriz de decisão normalizada, o processo envolve algumas etapas importantes: primeiro, é calculado a média das amostras e o desvio padrão de acordo com a equação (40), em que N é o número total de amostras, x_i é cada valor individual das amostras e \bar{x} é a média dos valores das amostras. Em seguida, calcula-se o fator gaussiano (desvio padrão dividido pela média para cada um dos critérios) para capturar a distribuição dos valores em torno da média. Posteriormente, é empregado a normalização do fator gaussiano garantindo que os pesos das amostras sejam ajustados de forma proporcional e equitativa, estes por sua vez, estão expostos na Tabela 11.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (40)$$

Tabela 11 - Valores para nova definição dos pesos da matriz de decisão no método AHP-Gaussiano.

AHP-Gaussiano						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Média	0,000864	0,000864	0,000864	0,000864	0,000864	0,000864
Desvio padrão	0,000473	0,000026	0,000027	0,000928	0,000462	0,000813
Fator gaussiano	0,547462	0,030611	0,030720	1,074603	0,535272	0,941519
Fator gaussiano normalizado	0,059292	0,003315	0,003327	0,116383	0,057972	0,101970
	C7	C8	C9	C10	C11	
Média	0,000864	0,000864	0,000864	0,000864	0,000864	
Desvio padrão	0,001801	0,000030	0,001548	0,000928	0,000938	
Fator gaussiano	2,085172	0,034476	1,792129	1,074603	1,086762	
Fator gaussiano normalizado	0,225831	0,003734	0,194094	0,116383	0,117700	

Fonte A autora, 2024.

Os pesos calculados orientarão o processo de classificação por meio da soma ponderada entre o fator gaussiano normalizado (peso atribuído) e a MD da Tabela 10, na qual cada valor das amostras normalizadas será multiplicado por este peso, e então estes produtos serão somados, resultando no *ranking* final do método AHP-Gaussiano apresentado na Tabela 12, indicando o modelo A859 como célula adequada para o BESS dimensionado.

Tabela 12 - Seleção final a partir do *ranking* de células das baterias com o método AHP-Gaussiano.

Modelo	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Ranking
A859	0,00024	0,00087	0,00087	0,00285	0,00181	0,00244	1°
A849	0,00121	0,00087	0,00087	0,00381	0,00253	0,00395	2°
A381	0,00073	0,00087	0,00087	0,00159	0,00144	0,00166	3°
A363	0,00097	0,00087	0,00087	0,00001	0,00007	0,00003	4°
...
A638	0,00024	0,00087	0,00087	0,00032	0,00043	0,00031	1157°
A776	0,00005	0,00075	0,00075	0,00033	0,00018	0,00041	1158°

Modelo	C7	C8	C9	C10	C11	Ranking
A859	0,00236	0,00086	0,00000	0,00285	0,00285	1°
A849	0,03802	0,00086	0,00000	0,00381	0,00380	2°
A381	0,01521	0,00086	0,00023	0,00159	0,00158	3°
A363	0,00002	0,00086	0,02106	0,00001	0,00001	4°
...
A638	0,00027	0,00086	0,00068	0,00032	0,00032	1157°
A776	0,00033	0,00098	0,00068	0,00033	0,00028	1158°

Fonte A autora, 2024.

Para o método AHP-Gaussiano Pearson, a análise se torna mais abrangente e aprimorada por empregar a matriz de critério *vs* critério apresentada na Tabela 13, a qual desempenha papel fundamental na determinação dos pesos relativos entre os diferentes critérios por utilizar a Correlação de Pearson ou Coeficiente de Pearson, que vai quantificar o grau de relação linear entre os critérios, avaliando se à medida que um critério aumenta, o outro também aumenta (correlação positiva), diminui (correlação negativa) ou permanece constante (correlação nula).

O coeficiente de correlação de Pearson foi calculado com base na equação (41) em que N é o número total de amostras, x_i e y_i é cada valor individual das amostras para o critério-x e para o critério-y, respectivamente, e por fim, \bar{x} e \bar{y} representam a média dos valores das amostras do critério-x e do critério-y, respectivamente. O resultado deve apresentar um valor que varia

entre -1 e 1 , em que -1 indica uma correlação negativa perfeita, 1 indica uma correlação positiva perfeita e 0 indica ausência de correlação linear.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (41)$$

Tabela 13 - Matriz de critério vs critério.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	0	0,035941	0,008353	0,373829	0,06397	0,32187
C2	0,035941	0	0,99616	0,18072	0,17936	0,12593
C3	0,008353	0,99616	0	0,21116	0,197125	0,152664
C4	0,373829	0,18072	0,21116	0	0,82888	0,98618
C5	0,06397	0,17936	0,197125	0,82888	0	0,861658
C6	0,32187	0,12593	0,152664	0,98618	0,861658	0
C7	0,14149	0,06631	0,07599	0,54764	0,474303857	0,56155
C8	0,01196	0,98802	0,99765	0,23259	0,209048	0,17185
C9	0,13010	0,03117	0,04014	0,35735	0,455039	0,37843
C10	0,373823	0,18072	0,21116	1	0,82888	0,98618
C11	0,372319	0,200109	0,231081	0,999600	0,82746	0,98324
	C7	C8	C9	C10	C11	
C1	0,14149	0,01196	0,13010	0,373823	0,372319	
C2	0,06631	0,98802	0,03117	0,18072	0,200109	
C3	0,07599	0,99765	0,04014	0,21116	0,231081	
C4	0,54764	0,23259	0,35735	1	0,999600	
C5	0,474303857	0,209048	0,455039	0,82888	0,82746	
C6	0,56155	0,17185	0,37843	0,98618	0,98324	
C7	0	0,08284	0,18349	0,54764	0,54482	
C8	0,08284	0	0,04655	0,232599	0,25278	
C9	0,18349	0,04655	0	0,35735	0,354505	
C10	0,54764	0,232599	0,35735	0	0,999600	
C11	0,54482	0,25278	0,354505	0,999600	0	

O cálculo realizado para montar a matriz da Tabela 13 foi executado utilizando a função PEARSON(matriz1, matriz2) no Excel®, em que nesta aplicação a matriz1 corresponde por exemplo a toda coluna do critério C1 e a matriz2 a toda coluna do critério C2, ou seja, caso a coluna C1 fosse formada pelos valores 2, 15, 6, 3, 8, 5 e a coluna C2 fosse formada pelos valores 11, 10, 6, 1, 2, 3, o coeficiente de Correlação de Pearson para estes conjuntos de dados seria de 0,277788407.

Numericamente é possível chegar neste mesmo resultado calculando a média da coluna C1 (6,5) e a média da coluna C2 (5,5), e os desvios das médias de acordo com a equação (41), que para C1 será $(x_i - \bar{x})$: (2 - 6,5), (15 - 6,5), (6 - 6,5), (3 - 6,5), (8 - 6,5), (5 - 6,5), e para C2 será $(y_i - \bar{y})$: (11 - 5,5), (10 - 5,5), (6 - 5,5), (1 - 5,5), (2 - 5,5), (3 - 5,5), após esta etapa, os valores são multiplicados e considerados no somatório final do numerador $\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ resultando no valor de 27,75. Em seguida, calculam-se as somas dos quadrados dos desvios para cada coluna, logo, para C1 será $\sum(x_i - \bar{x})^2 = (-4,5)^2 + (8,5)^2 + (-0,5)^2 + (-3,5)^2 + (1,5)^2 + (-1,5)^2$ resultando em 109,75, e para C2 será $\sum(y_i - \bar{y})^2 = (5,5)^2 + (4,5)^2 + (0,5)^2 + (-4,5)^2 + (-3,5)^2 + (-2,5)^2$ resultando em 89,75.

Substituindo os valores encontrados na equação (41), o coeficiente de correlação de Pearson entre as colunas C1 e C2 encontrado é de aproximadamente 0,279767, que é bastante próximo do resultado fornecido pelo Excel®, em que as pequenas diferenças podem ser atribuídas a arredondamentos durante os cálculos. Ainda, na leitura da matriz da Tabela 13 é possível notar um resultado interessante acerca da correlação entre a capacidade das células (C4) e a corrente máxima das células (C10) resultando no valor 1, isso significa que há uma correlação positiva perfeita entre essas duas variáveis. Em outras palavras, à medida que a capacidade das células aumenta, a corrente máxima também aumenta na mesma proporção, sugerindo que as células com maior capacidade também podem suportar correntes máximas mais elevadas.

Com base nesta matriz foi calculado a média dos critérios que determina sua relevância no processo de decisão, e com o fator de correção (calcula-se subtraindo 1 do valor da média, e multiplicando o resultado pelo fator gaussiano normalizado) derivado da análise de correlação, sendo combinado com o mesmo fator gaussiano normalizado da análise do método AHP-Gaussiano, gera-se um novo conjunto de pesos para as amostras exposto na Tabela 14.

Tabela 14 - Valores para nova definição dos pesos da matriz de decisão no método AHP-Gaussiano com correlação de Pearson.

AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson						
	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Fator gaussiano normalizado	0,059291	0,00331	0,0033	0,11638	0,05797	0,10196
Média dos critérios	0,166699	0,27131	0,28377	0,51981	0,44779	0,50269
Fator de correção	0,049408	0,00241	0,00238	0,0558	0,03200	0,05071
Novo peso	0,079709	0,00389	0,00384	0,09015	0,05164	0,08181
	C7	C8	C9	C10	C11	
Fator gaussiano normalizado	0,22583	0,0037	0,19409	0,11638	0,11769	
Média dos critérios	0,29328	0,29326	0,21219	0,51981	0,52414	
Fator de correção	0,15959	0,00263	0,15290	0,05588	0,05600	
Novo peso	0,25747	0,004257	0,246683	0,09015	0,09035	

Fonte A autora, 2024.

Por fim, após a soma ponderada entre o novo peso atribuído e a MD da Tabela 10, na qual cada valor das amostras normalizadas será multiplicado por este peso e depois terão seus produtos somados, o resultado do novo processo de classificação resulta no *ranking* final do método AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson apresentado na Tabela 15, indicando também o modelo A859 como célula adequada para o BESS dimensionado.

Tabela 15 - Seleção final a partir do *ranking* de células das baterias com o método AHP-Gaussiano com correlação de Pearson.

Modelo	C1	C2	C3	C4	C5	C6	Ranking
A859	0,00024	0,00087	0,00087	0,00285	0,00181	0,00244	1°
A849	0,00121	0,00087	0,00087	0,00381	0,00253	0,00395	2°
A363	0,00097	0,00087	0,00087	0,00001	0,00007	0,00003	3°
A362	0,00097	0,00087	0,00087	0,00001	0,00007	0,00003	4°
...
A638	0,00024	0,00087	0,00087	0,00032	0,00043	0,00031	1157°
A776	0,00005	0,00075	0,00075	0,00033	0,00018	0,00041	1158°

Modelo	C7	C8	C9	C10	C11	Ranking
A859	0,00236	0,00086	0,00000	0,00285	0,00285	1°
A849	0,03802	0,00086	0,00000	0,00381	0,00380	2°
A363	0,00002	0,00086	0,02106	0,00001	0,00001	3°
A362	0,00002	0,00086	0,02106	0,00001	0,00001	4°
...
A638	0,00027	0,00086	0,00068	0,00032	0,00032	1157°
A776	0,00033	0,00098	0,00068	0,00033	0,00028	1158°

Fonte A autora, 2024.

A Tabela 16 expõe o resultado geral da simulação para a metodologia proposta, e expõe a comparação entre os métodos AHP-Gaussiano e AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson. Além disso, a Tabela 16 apresenta os valores normalizados para cada modelo de tecnologia de bateria sob a ordenação do resultado para o ranqueamento, e dela é possível identificar os dois melhores modelos de tecnologia apontados pelos métodos para o dimensionamento do BESS do veículo elétrico da equipe Evolt Racing, são eles: o modelo A859, que corresponde ao valor normalizado de 0,010968365 para o AHP-Gaussiano e 0,011787091 para o AHP-Gaussiano

Pearson, e o modelo A849, que corresponde ao valor normalizado de 0,010548804 para o AHP-Gaussiano e 0,011378962 para o AHP-Gaussiano Pearson. Entre as tecnologias inadequadas do ponto de vista do dimensionamento, estão os modelos A638, que corresponde ao valor normalizado de 0,010968365 para o AHP-Gaussiano e 0,011787091 para o AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson, e o modelo A776 que corresponde ao valor normalizado de 0,000755931 para o AHP-Gaussiano e 0,00076151 para o AHP-Gaussiano Pearson.

Tabela 16 - Resultado normalizado e comparação entre o método AHP-Gaussiano e AHP-Gaussiano Pearson.

<i>Ranking</i>	Tecnologia das Baterias		Valores Normalizados	
	Método			
	AHP-Gaussiano	AHP-Gaussiano Pearson	AHP-Gaussiano	AHP-Gaussiano Pearson
1°	A859	A859	0,010968365	0,011787091
2°	A849	A849	0,010548804	0,011378962
3°	A381	A363	0,004338615	0,004168926
4°	A363	A362	0,000748002	0,000922561
5°	A362	A381	0,004168503	0,004678987
...
1154°	A688	A684	0,000390749	0,000404667
1155°	A563	A860	0,000390537	0,000403509
1156°	A684	A819	0,000388724	0,000403277
1157°	A638	A638	0,00075368	0,000751582
1158°	A776	A776	0,000755931	0,00076151

Fonte: A autora, 2024.

4.1 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Dos resultados da simulação apresentados na Tabela 16, é possível notar uma grande consistência entre os métodos AHP-Gaussiano e AHP-Gaussiano Pearson, com os mesmos itens sendo classificados nas mesmas posições, como por exemplo o modelo “A859” em primeiro lugar em ambos os métodos, isso sugere uma concordância entre estes dois métodos de análise. Embora os mesmos itens sejam classificados nas mesmas posições, os valores normalizados associados a esses itens variam ligeiramente entre os dois métodos, e podem ser atribuídas às diferentes abordagens matemáticas de critérios de análise adotados por cada método.

A partir da análise dos valores normalizados, é possível observar que os modelos de baterias que ocupam as primeiras posições têm valores consideravelmente mais altos do que os que ocupam posições inferiores. Isso sugere uma estabilidade na classificação desses modelos, com uma distinção entre os que estão mais bem avaliados e os que estão abaixo na avaliação. Enquanto as alternativas no topo do *ranking* têm valores normalizados significativamente diferentes das que estão nas últimas posições, as diferenças nos valores normalizados entre os modelos nas posições intermediárias são menos pronunciadas. Isso sugere que, à medida que há a aproximação das classificações inferiores, a distinção entre eles se torna menos evidente, indicando uma maior incerteza ou ambiguidade nas avaliações.

Para verificação do que foi discutido acima, na Tabela 17 é fornecido uma análise detalhada dos resultados obtidos exclusivamente pelo método AHP-Gaussiano, destacando *rankings* e informações específicas sobre os modelos de simulação e características das células de bateria avaliadas, com o objetivo de fornecer um resumo abrangente dos resultados obtidos pelo método, de acordo com vários parâmetros relacionados às células de bateria, como taxa de descarga, tensão, capacidade, corrente máxima, volume, peso, entre outros.

Tabela 17 - Resultado geral do método AHP-Gaussiano.

<i>Ranking</i>	Modelo da Simulação	Modelo Correspondente do Fabricante	Taxa Máxima de Descarga Contínua (C)	Tensão Nominal (V)	Tensão de Carregamento (V)
1°	A859	SLPBA096235	10	3,70	4,20
2°	A849	SLPBA7C0185	25	3,70	4,20
3°	A381	SLPB9764159	30	3,70	4,20
4°	A363	SLPB4115025	20	3,70	4,20
5°	A362	SLPB6510023	20	3,70	4,20
...
1154°	A688	LFP8030085	1	3,20	3,65
1155°	A563	SLPBA620072HV	3	3,80	4,35
1156°	A684	SLPB8225095	5	3,70	4,20
1157°	A638	SLPB8029078	5	3,70	4,20
1158°	A776	LFP8041072	1	3,20	3,65

<i>Ranking</i>	Modelo da Simulação	Modelo Correspondente do Fabricante	Capacidade (mAh)	Corrente Máxima de Descarga das Guias (A)	Volume das Células (ml)
1°	A859	SLPBA096235	27500	200	217,229
2°	A849	SLPBA7C0185	24000	280	216,654
3°	A381	SLPB9764159	10000	160	90,987
4°	A363	SLPB4115025	75	8	1,492
5°	A362	SLPB6510023	75	8	1,449
...

(continua)

Tabela 17 - Resultado geral do método AHP-Gaussiano.

<i>Ranking</i>	Modelo da Simulação	Modelo Correspondente do Fabricante	Capacidade (mAh)	Corrente Máxima de Descarga das Guias (A)	Volume das Células (ml)
1154°	A688	LFP8030085	1750	16	19,890
1155°	A563	SLPBA620072HV	1800	32	15,038
1156°	A684	SLPB8225095	2100	32	18,763
1157°	A638	SLPB8029078	2000	48	16,898
1158°	A776	LFP8041072	2050	20	22,747

<i>Ranking</i>	Modelo da Simulação	Modelo Correspondente do Fabricante	Peso (g)	Quantidade de Células em Série	Quantidade de Células em Paralelo
1°	A859	SLPBA096235	5180,0	21	0
2°	A849	SLPBA7C0185	5000,0	21	0
3°	A381	SLPB9764159	2000,0	21	1
4°	A363	SLPB4115025	2,2	21	93
5°	A362	SLPB6510023	2,0	21	93
...	32
1154°	A688	LFP8030085	38,0	24	4
1155°	A563	SLPBA620072HV	30,0	20	4
1156°	A684	SLPB8225095	38,0	21	3
1157°	A638	SLPB8029078	35,5	21	3
1158°	A776	LFP8041072	44,0	24	3

(continuação)

Tabela 17 - Resultado geral do método AHP-Gaussiano.

<i>Ranking</i>	Modelo da Simulação	Modelo Correspondente do Fabricante	Corrente Máxima das Células (A)	Potência Máxima das Células (W)
1°	A859	SLPBA096235	27,5	101,75
2°	A849	SLPBA7C0185	24	88,8
3°	A381	SLPB9764159	10	37
4°	A363	SLPB4115025	0,075	0,2775
5°	A362	SLPB6510023	0,075	0,2775
...
1154°	A688	LFP8030085	1,75	5,6
1155°	A563	SLPBA620072HV	1,8	6,84
1156°	A684	SLPB8225095	2,1	7,77
1157°	A638	SLPB8029078	2	7,4
1158°	A776	LFP8041072	2,05	6,56

(conclusão)

Fonte: A autora, 2024.

O mesmo é feito para expor detalhadamente os resultados obtidos exclusivamente pelo método AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson, estes apresentados na Tabela 18. Dessa forma, enquanto a Tabela 16 foca em informações comparativas entre os métodos de análise e nas classificações resultantes, a Tabela 17 e Tabela 18 expõem detalhes específicos sobre as tecnologias de baterias e o *ranking* geral associado aos 11 (onze) critérios definidos.

Tabela 18 - Resultado geral do método AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson.

<i>Ranking</i>	Modelo da Simulação	Modelo Correspondente do Fabricante	Taxa Máxima de Descarga Contínua (C)	Tensão Nominal (V)	Tensão de Carregamento (V)
1°	A859	SLPBA096235	10	3,70	4,20
2°	A849	SLPBA7C0185	25	3,70	4,20
3°	A363	SLPB4115025	20	3,70	4,20
4°	A362	SLPB6510023	20	3,70	4,20
5°	A381	SLPB9764159	30	3,70	4,20
...
1154°	A684	SLPB8225095	5	3,70	4,20
1155°	A860	SLPB6951071	1	3,70	4,20
1156°	A819	SLPB6242085	3	3,70	4,20
1157°	A638	SLPB8029078	5	3,70	4,20
1158°	A776	LFP8041072	1	3,20	3,65

<i>Ranking</i>	Modelo da Simulação	Modelo Correspondente do Fabricante	Capacidade (mAh)	Corrente Máxima de Descarga das Guias (A)	Volume das Células (ml)
1°	A859	SLPBA096235	27500	200	217,229
2°	A849	SLPBA7C0185	24000	280	216,654
3°	A363	SLPB4115025	75	8	1,492
4°	A362	SLPB6510023	75	8	1,449
5°	A381	SLPB9764159	10000	160	90,987
...

(continua)

Tabela 18 - Resultado geral do método AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson.

<i>Ranking</i>	Modelo da Simulação	Modelo Correspondente do Fabricante	Capacidade (mAh)	Corrente Máxima de Descarga das Guias (A)	Volume das Células (ml)
1154°	A684	SLPB8225095	2100	32	18,763
1155°	A860	SLPB6951071	3050	20	23,854
1156°	A819	SLPB6242085	2800	48	21,546
1157°	A638	SLPB8029078	2000	48	16,898
1158°	A776	LFP8041072	2050	20	22,747

<i>Ranking</i>	Modelo da Simulação	Modelo Correspondente do Fabricante	Peso (g)	Quantidade de Células em Série	Quantidade de Células em Paralelo
1°	A859	SLPBA096235	5180,0	21	0
2°	A849	SLPBA7C0185	5000,0	21	0
3°	A363	SLPB4115025	2,2	21	93
4°	A362	SLPB6510023	2,0	21	93
5°	A381	SLPB9764159	2000,0	21	1
...	32
1154°	A684	SLPB8225095	38,0	21	3
1155°	A860	SLPB6951071	52,0	21	2
1156°	A819	SLPB6242085	48,5	21	2
1157°	A638	SLPB8029078	35,5	21	3
1158°	A776	LFP8041072	44,0	24	3

(continuação)

Tabela 18 - Resultado geral do método AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson.

<i>Ranking</i>	Modelo da Simulação	Modelo Correspondente do Fabricante	Corrente Máxima das Células (A)	Potência Máxima das Células (W)
1°	A859	SLPBA096235	27,5	101,75
2°	A849	SLPBA7C0185	24	88,8
3°	A363	SLPB4115025	0,075	0,2775
4°	A362	SLPB6510023	0,075	0,2775
5°	A381	SLPB9764159	10	37
...
1154°	A684	SLPB8225095	2,1	7,77
1155°	A860	SLPB6951071	3,05	11,285
1156°	A819	SLPB6242085	2,8	10,36
1157°	A638	SLPB8029078	2	7,4
1158°	A776	LFP8041072	2,05	6,56

(conclusão)

Fonte: A autora, 2024.

Com base na Tabela 17 e na Tabela 18, o modelo de simulação que ficou em primeiro lugar é o “A859”, correspondente ao modelo do fabricante “SLPBA096235”. Este modelo possui uma alta taxa máxima de descarga contínua, o que sugere uma capacidade de fornecer uma quantidade significativa de energia de forma constante ao longo do tempo, característica desejável em aplicações que exigem um fornecimento constante de energia como os veículos elétricos. As tensões nominais e de carregamento associadas a este modelo são padrões e compatíveis com muitas aplicações de bateria, conforme comentado por Ferreira (2014). Uma tensão nominal de 3,70 V e uma tensão de carregamento de 4,20 V são comuns em sistemas de bateria de íon de lítio.

Este modelo possui uma capacidade de 27.500 mAh, o que indica uma elevada capacidade de armazenamento de energia, sendo adequado para aplicações que exigem longos períodos de operação sem recarga frequente, além disso, a corrente máxima de descarga de 200 A indica uma capacidade de fornecer altas correntes de saída quando necessário, importante em

aplicações de alta potência, como veículos elétricos ou sistemas de armazenamento de energia para uso em picos de demanda. O volume das células para este modelo é de 217,229 ml, indicando o espaço físico ocupado pelas células de bateria individuais e que é relevante para aplicações em que o espaço é limitado. O peso do modelo é de 5.180 gramas, também considerado um fator crucial especialmente em aplicações de mobilidade, em que o peso das baterias pode afetar significativamente o desempenho e a eficiência do veículo.

O modelo “A859” consiste na configuração de 21 células em série e 0 células em paralelo para o dimensionamento do BESS do VE tipo fórmula, sendo esta a configuração da bateria, em que as células são conectadas em série para aumentar a tensão total da bateria, enquanto a quantidade de células em paralelo pode afetar a capacidade de corrente e a capacidade total da bateria. Por fim, com uma corrente máxima das células de 27,5 A e uma potência máxima das células de 101,75 W, este modelo demonstra uma capacidade de fornecer altas correntes e potências quando necessário.

O modelo que ficou em último lugar na Tabela 17 e Tabela 18, o modelo “A776” correspondente ao modelo do fabricante “LFP8041072”, apresentou uma posição de classificação mais baixa em todos os parâmetros avaliados, ou seja, na taxa máxima de descarga contínua, capacidade, corrente máxima de descarga das guias, volume das células, peso, quantidade de células em série, quantidade de células em paralelo, corrente máxima das células e potência máxima das células.

Com uma capacidade de apenas 2.050 mAh e uma potência máxima das células de 6,56 W, o modelo “A776” demonstra uma capacidade de armazenamento de energia e uma capacidade de fornecer energia significativamente inferiores em comparação com outros modelos. Além disso, este modelo tem 24 células em série e 3 células em paralelo, o que resulta em uma configuração que não é ideal para esta aplicação deste estudo em específico.

Ainda assim, por possuir um peso de 44 gramas, este modelo é relativamente leve, o que pode ser uma vantagem nas aplicações em que o peso é uma consideração crítica. No entanto, o peso mais baixo também pode estar associado a uma capacidade de armazenamento de energia mais baixa. A corrente máxima de suas células é de apenas 2,05 A, indicando um modelo com limitações em termos de capacidade de fornecer energia em altas taxas de descarga, diminuindo sua aplicabilidade em aplicações que exigem alto desempenho ou até uma resposta rápida.

5 CONCLUSÃO

Baseado na crescente emissão de gás carbônico, e conseqüentemente no impacto das mudanças climáticas, a transição para veículos elétricos (VEs) foi discutida como uma importante solução para reduzir as emissões de gases poluentes. Desta solução, o presente trabalho destacou o aumento na produção de VEs e a necessidade de investimento em energias renováveis e sistemas de armazenamento de energia. Assim, como proposta principal, o estudo apresentado buscou abordar o dimensionamento do BESS para um VE do tipo fórmula, fundamentado em métodos eficazes por meio de uma abordagem metodológica, incluindo pesquisas e estudos específicos encontrados na literatura, e por fim, a simulação para validação do método proposto.

Sobre o dimensionamento do BESS, os estudos citados se mostraram capazes de abordar individualmente descrições e modelagens de energia em veículos elétricos, e em alguns casos, estendendo-se para modelos em aplicações de BEVs, sendo de grande interesse para este trabalho. É perceptível que a maioria das equações expostas nos estudos possuem bastante similaridade com o método geral de descrição de forças, potências e energia em VEs, demonstrado no primeiro estudo citado. Apesar das abordagens obviamente possuírem diferenças quando há consideração de um parâmetro ou outro, em todos eles, os resultados são satisfatórios para as devidas condições impostas, e as justificativas para o descarte de algum parâmetro é coesa e compreensível.

Não obstante, o estudo escolhido para fundamentar o cálculo do dimensionamento do BESS tanto pela continuação do desenvolvimento e apresentação de trabalhos mais recentes, quanto pelo modelo mais refinado apresentado em que se utiliza técnicas fundamentais da dinâmica veicular, como a Lei de Newton, para estimar o consumo de energia em diferentes condições de condução, foi capaz de apresentar uma base sólida e abrangente para a metodologia deste estudo, contribuindo com uma melhor compreensão das demandas energéticas do VE estudado.

Sobre os métodos de tomada de decisão, diante da complexidade na seleção de um sistema de armazenamento de energia para um determinado projeto, devido à variedade de modelos de células disponíveis e suas especificidades, tornou-se crucial adotar uma abordagem criteriosa. A escolha do modelo de célula e, por conseguinte, do dimensionamento do BESS para a aplicação específica do VE, dependia de diversos fatores, assim, a MCDA foi a ferramenta capaz de fornecer uma estrutura robusta para avaliar alternativas e explorar necessidades, sem depender exclusivamente de julgamentos humanos.

Neste trabalho também foi discutida a eficácia do MCDA na seleção de tecnologias de armazenamento de energia em que a mesma fornece uma orientação sólida para essa tomada de decisão complexa. Ao eliminar o viés humano e fundamentar-se em métodos reconhecidos como o AHP, por meio do método AHP-Gaussiano e AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson, este trabalho propôs uma metodologia que buscou suprir essa lacuna na literatura, visando garantir resultados mais confiáveis e seguros na seleção de células de baterias para veículos elétricos, proporcionando uma análise precisa e eficiente, que contribuísse para avanços significativos no campo do dimensionamento para o sistema de armazenamento de energia de um VE.

Dos métodos implementados, e conforme comentado, ambos forneceram resultados semelhantes, demonstrando a exatidão de suas aplicações ao objetivo do trabalho e comprovando entre eles suas próprias eficiências. Contudo, o AHP-Gaussiano foi uma abordagem mais simplificada que forneceu resultados rápidos e fáceis de serem interpretados. Logo, o método é uma aprimoração do método AHP adequado para problemas em que a correlação entre os critérios não é uma consideração crucial e quando a simplicidade e a rapidez na tomada de decisões são prioritárias. Por outro lado, o AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson incorpora a correlação entre os critérios na análise, levando a uma avaliação mais precisa e detalhada das alternativas. Logo, o método é uma aprimoração do método AHP adequado para uma abordagem mais apropriada devido a relação entre os critérios ser significativa, mesmo exigindo mais tempo e recursos.

Do ponto de vista da simulação, devido a simplicidade de utilização do Excel, as fórmulas que ambos os métodos possuem, foram aplicadas favoravelmente visto que o software já fornece uma vasta quantidade de ferramentas para análise de dados e estatísticas, tornando a cargo do autor o direcionamento e aplicabilidade do dimensionamento do BESS para VEs. Este método pode ser estendido para qualquer que seja o tipo do VE, tanto em relação ao dimensionamento do BESS, que devido a escolha das fórmulas para cálculo de potência e energia dos VEs os autores citados já enfatizam esta possibilidade, quanto para o dimensionamento do *pack* de baterias.

Para posteriores desenvolvimentos ou aplicações que sejam baseadas neste documento, tanto o AHP-Gaussiano quanto o AHP-Gaussiano com Correlação de Pearson são recomendáveis para uma aplicação de tomadas de decisão que envolvam diversos critérios e amostras, não só na área que abrange VEs e dimensionamento do *pack* de baterias, uma vez que, com base nos resultados apresentados por exemplo, pode-se identificar áreas em que são necessárias mais pesquisas ou desenvolvimentos, se certos modelos estão consistentemente

classificados mais baixo devido às limitações específicas, isso pode indicar oportunidades para melhorias ou inovações futuras.

Por fim, para pesquisas futuras seria interessante e apropriado o desenvolvimento de um sistema de suporte à decisão para dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia para veículos elétricos, em que poderia envolver a criação de um sistema computacional que integra diferentes métodos de seleção de células de bateria e dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia. O sistema poderia ser projetado para ajudar os fabricantes de veículos elétricos a tomar decisões informadas e otimizadas sobre a seleção de tecnologias de bateria e o dimensionamento de sistemas de armazenamento de energia para seus veículos, considerando uma variedade de critérios e restrições.

REFERÊNCIAS

- ASAMER, Johannes; GRASER, Anita; HEILMANN, Bernhard; RUTHMAIR, Mario. Sensitivity analysis for energy demand estimation of electric vehicles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 46, p. 182–199, 2016. DOI: 10.1016/j.trd.2016.03.017. Disponível em: Sensitivity analysis for energy demand estimation of electric vehicles - ScienceDirect. Acesso em: 16 abr. 2023.
- ARAÚJO, Rui Jorge dos Santos; BALTAZAR, Conceição. Baterias: a “alma” dos veículos elétricos não para de somar vantagens. **Neutro à Terra**, [S. l.], n. 27, p. 25, 2021. DOI: 10.34630/neutroaterra.vi27.4440. <https://doi.org/10.34630/neutroaterra.vi27.4440>. Acesso em: 12 abr. 2023.
- BAUMANN, Manuel; WEIL, Marcel; PETERS, Jens F.; CHIBELES-MARTINS, Nelson; MONIZ, Antonio B. A review of multi-criteria decision making approaches for evaluating energy storage systems for grid applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, p. 516–534, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.02.016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.016>. Acesso em: 02 abr. 2023
- BERMÚDEZ -RODRÍGUEZ, Tatiana; CONSONI, Flavia Luciane. Uma abordagem da dinâmica do desenvolvimento científico e tecnológico das baterias lítio-íon para veículos elétricos. **Revista Brasileira de Inovação**, Campinas, SP, v. 19, p. e0200014, 2020. DOI: 10.20396/rbi.v19i0.8658394. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/rbi.v19i0.8658394>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- BROOKES, V. J.; DEL RIO VILAS, V. J.; WARD, M. P. Disease prioritization: what is the state of the art?. **Epidemiology and Infection**, v. 143, n. 14, p. 2911-2922, out. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0950268815000801>. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0950268815000801>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- CASTRO, Bernardo Hauch Ribeiro de; BARROS, Daniel Chiari; VEIGA, Suzana Gonzaga da. Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, RJ, 2013. n. 37, p. 443-496. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1511>. Acesso em: 16 mar. 2024.
- EHSAN, Ali; YANG, Qiang. Active distribution system reinforcement planning with EV charging stations—part I: uncertainty modeling and problem formulation. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, v. PP, p. 1-1, 2019. DOI: 10.1109/TSTE.2019.2915338. Disponível em: 10.1109/TSTE.2019.2915338. Acesso em: 17 mar. 2024.
- EHSANI, Mehrdad *et al.* Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. 3rd ed. **Boca Raton: CRC Press**, 2018. 572 p. ISBN 9780429504884.
- ERDELIC, Tomislav; CARIC, Tonči. A Survey on the Electric Vehicle Routing Problem: Variants and Solution Approaches. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2019, 5075671, 48 p., 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/5075671>. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/5075671>. Acesso em 17 mar. 2024.

FERNANDES, Lúcio Mascarenhas. Estudos Para a Implantação Do Conceito Vehicle To Grid Na Rede Elétrica Do Ct/Ufrj. **Projeto de Graduação**. Rio de Janeiro: POLITÉCNICA, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10019849.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2023.

FERREIRA, Tarcísio José Pedrobon. Sistema de gerenciamento de energia para controle de carga/descarga entre baterias de lítio e ultracapacitores, envolvendo sistema de tração elétrica com frenagem regenerativa. **Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia**, p. 195, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/123110>. Acesso em: 6 out. 2022.

GOMES, C.; Rodrigues, M.; Costa, I.; Santos, M. Ordering of warships for the Brazilian navy using the new method: AHP-Gaussian with Pearson's correlation. **Frontiers in Artificial Intelligence and Applications**, v. 341, n. November, p. 104–111, 2021. DOI: 10.3233/FAIA210237. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/355882670_Ordering_of_Warships_for_the_Brazilian_Navy_Using_the_New_Method_AHP-Gaussian_with_Pearson's_Correlation. Acesso em: 22 abr. 2023.

KREMPSER, A. Metodologia de Aquisição de Dados de Baterias para Tração de Veículos Elétricos e Sua Integração com as Redes de Energia. **Projeto de Graduação**. Rio de Janeiro: UERJ, 2013. Disponível em: FEN/UERJ - Produção Científica e Tecnológica. Acesso em: 22 mar. 2024.

P. S., Praveena Krishna; N. S., Jayalakshmi; Kedlaya, Akash. Energy Management Strategies for Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles: A Review. **IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)**, Bangalore, India, 2020. DOI: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198655. Disponível em: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198655. Acesso em: 18 mar. 2024.

KURAN, Mehmet *et al.* A Smart Parking Lot Management System for Scheduling the Recharging of Electric Vehicles. *In: IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, [S. I.], vol. 6, no. 6, pp. 2942-2953, Nov. 2015. DOI: 10.1109/TSG.2015.2403287. Disponível em: 10.1109/TSG.2015.2403287. Acesso em: 17 mar. 2024.

LEBEL, Félix-Antoine *et al.* Battery Pack Sizing Method - Case Study of an Electric Motorcycle. Em: **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)**, Chicago, IL, USA, 2018, n. 1938-8756, p. 1-6. DOI: 10.1109/VPPC.2018.8604955. Disponível em: 10.1109/VPPC.2018.8604955. Acesso em: 19 mar. 2024.

LI, Xiangjun; WANG, Shangxing. Energy Management and Operational Control Methods for Grid Battery Energy Storage Systems. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, v. 7, n. 5, p. 1079-1088, set. 2021. DOI: 10.17775/CSEEJPES.2019.00160. Disponível em: 10.17775/CSEEJPES.2019.00160. Acesso em: 11 de out. 2023.

LIDBECK, Anton; SYED, Kazim. Experimental Characterization of Li-ion Battery cells for Thermal Management in Heavy Duty Hybrid Applications. **Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden**, Gothenburg, Sweden, p. 1-89, 2017. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/252994>. Acesso em: 3 out. 2022.

LIMA, Yuri.; ALVES, Adriany; SILVA, Italo; SALVADORI, Fabiano.; ARAÚJO, Marcel. Seleção de Baterias para Sistemas de Armazenamento de Energia pela Aplicação do Método AHP. **Sociedade Brasileira de Automatica - SBA**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 1-8, dez. 2020. DOI: 10.48011/asba.v2i1.1071. Disponível em: <https://doi.org/10.48011/asba.v2i1.1071>. Acesso em: 22 mar. 2024.

MAGDALON, Isabela Muniz. **Valorização das Baterias de Iões Lítio em Fim de Vida de Veículos Elétricos**. 2020. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automóvel) – Universidade de Coimbra, Coimbra. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.8/6360>. Acesso em: 19 nov. 2022.

MARGRETHE, Dina Aspen; MAGNUS, Sparrevik.; FET, Annik Magerholm. Review of methods for sustainability appraisals in ship acquisition. **Environment Systems and Decisions**, [S. l.], v. 35, n. 3, p. 323–333, 2015. DOI: 10.1007/s10669-015-9561-6. Acesso em 2 de jul. 2022.

NEOCHARGE. **NeoCharge - Carro Elétrico, Carregadores e Mobilidade Elétrica**. 2024. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/>. Acesso em: 10 mar. 2024.

NOCE, Toshizaemom. **Estudo do Funcionamento de Veículos Elétricos e Contribuições ao Seu Aperfeiçoamento**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Disponível em: https://cdn.hackaday.io/files/9272396693248/EngMecanica_NoceT_1.pdf. Acesso em: 3 out. 2022.

ONAR, Omer. C.; STARKE, Michal; ANDREWS, G. P.; JACKSON, Roderick. Modeling, controls, and applications of community energy storage systems with used EV/PHEV batteries. *In: IEEE Transportation Electrification Conference And Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, USA, pp. 1-6, 2012. DOI: 10.1109/ITEC.2012.6243508. Disponível em: 10.1109/ITEC.2012.6243508. Acesso em: 01 abr. 2024.

PELLETIER, Louis; LEBEL, Felix Antoine; ANTUNES, Carlos Henggeler; TROVAO, Joao Pedro F. Sizing of a battery pack based on series/parallel configurations for a high-power electric vehicle as a constrained optimization problem. *In: IEEE Transactions On Vehicular Technology*, [S. l.], vol. 69, no. 12, pp. 14150-14159, 2020. DOI: 10.1109/TVT.2020.3004010. Disponível em: 10.1109/TVT.2020.3004010. Acesso em: 03 abr. 2024.

PELLETIER, Louis.; LEBEL, Felix Antoine.; RUBIO, Rubén.; ROUX, Marc-Andre.; TROVÃO, João Pedro. Design of a high performance battery pack as a constraint satisfaction problem. *In: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Chicago, IL, USA, 2018, pp. 1-6, DOI: 10.1109/VPPC.2018.8604956. Disponível em: 10.1109/VPPC.2018.8604956. Acesso em 03 abr. 2024.

EVolt RACING. **EVolt Racing - Equipe de Fórmula-E de Pernambuco**. 2024. Disponível em: www.evoltracing.com.br. Acesso em: 5 jan. 2024.

RADE, Minal. Design and development of hybrid energy storage system for electric vehicle. *In: International Conference On Information, Communication, Engineering And*

Technology (ICICET), Pune, India, 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICICET.2018.8533757. Disponível em: 10.1109/ICICET.2018.8533757. Acesso em: 05 mar. 2024.

REN, Jingzheng. Sustainability prioritization of energy storage technologies for promoting the development of renewable energy: A novel intuitionistic fuzzy combinative distance-based assessment approach. **Renewable Energy**, v. 121, p. 666–676, 2018. DOI: 10.1016/j.renene.2018.01.087. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.087>. Acesso em: 3 out. 2022.

SANTOS, Marcos.; ARAÚJO, Igor Costa.; GOMES, Carlos Francisco Simões. Multicriteria Decision-Making In The Selection Of Warships: A New Approach To The Ahp Method. *In: International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, v. 13, n. 1, p. 147–169, 2021. DOI: 10.13033/ijahp.v13i1.833. Acesso em: 3 de mar. 2023.

SCROSATI, Bruno.; GARCHE, Juergen. Lithium batteries: Status, prospects and future. **Journal of Power Sources**, [S. l.], v. 195, n. 9, p. 2419–2430, 2010. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.048. Acesso em: 5 de mar. 2023.

SHAH, Fawad Ali; SHAHZAD SHEIKH, Shehzar; MIR, Umer Iftikhar; OWAIS ATHAR, Syed. Battery health monitoring for commercialized electric vehicle batteries: Lithium-ion. *In: International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*, Istanbul, Turkey, 2019, pp. 1-6. DOI: 10.1109/PGSRET.2019.8882735. Disponível em: 10.1109/PGSRET.2019.8882735. Acesso em 4 abr. 2024.

SILVA, Rogério Diogne de Souza. Novas Tecnologias e Infraestrutura do Setor Elétrico Brasileiro – Armazenamento de Energia Em Baterias. Em: **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea)**, Brasília, Distrito Federal, [S. l.], 2021. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11111>. Acesso em: 8 mar. 2024.

SILVEIRA, Flávio Gonçalves da. **Gestão térmica em baterias de tração de veículos elétricos**. 2020. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automóvel) – Universidade de Coimbra, Coimbra. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.8/5053>. Acesso em: 10 abr. 2022.

SOUZA, Danilo Ferreira de. **Uma avaliação do desempenho de motores elétricos de indução trifásicos comercializados no Brasil entre 1945-2016 e o impacto da legislação brasileira**. 2018. 125 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/D.106.2018.tde-11072018-185050. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.106.2018.tde-11072018-185050>. Acesso em 5 mar. 2024.

TSCHARAKTSCHIEW, Stefan. REIMANN, Felix.; EVANGELINOS, Christos. Repositioning of driverless cars: Is return to home rather than downtown parking economically viable?. *In: Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, [S. l.], v. 13, p. 100547, 2022. DOI: 10.1016/j.trip.2022.100547. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100547>. Acesso em: 20 nov. 2022.

VO-DUY , Thanh; TROVAO, Joao Pedro; JEMEI, Samir.; BOULON, Loic; TA, Minh; BOUSCAYROL, Alain. Sizing and Energy Management of Hybrid dual-Energy Storage

System for a Commercial Electric Vehicle. *In: IEEE VTS Motor Vehicles Challenge 2022*, Gijon, Spain, 2021, pp. 1-6. DOI: 10.1109/VPPC53923.2021.9699344. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9699344>. Acesso em 11 mar. 2024.

VOLAN, Tainara. **Estudo prospectivo do sistema tecnológico de inovação de baterias em fim de vida de veículos elétricos no Reino Unido**. 2021. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/220521>. Acesso em 25 mar. 2024.

WEI, Le.; HOU, Junhong.; QIN, Tengting.; YUAN, Zhaoxiong.; YAN, Yuanyuan. Evaluation of grid energy storage system based on AHP-PROMETHEE-GAIA. *In: 35th Chinese Control Conference (CCC)*, Chengdu, China, 2016, pp. 9787-9792. DOI: 10.1109/ChiCC.2016.7554908. Disponível em: 10.1109/ChiCC.2016.7554908. Acesso em: 1 de mar. 2024.

WU, Xinkai; FREESE, David; CABRERA, Alfredo; KITCH, William. Electric vehicles' energy consumption measurement and estimation. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [S. l.], v. 34, p. 52–67, 2015. DOI: 10.1016/j.trd.2014.10.007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.007>. Acesso em: 16 nov. 2022.

YANG, Shichun; LI, Ming; LIN, Yizhou; TANG, Tieqiao. Electric vehicle's electricity consumption on a road with different slope. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, [S. l.], v. 402, p. 41–48, 2014. DOI: 10.1016/j.physa.2014.01.062. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.01.062>. Acesso em: 11 mar. 2024.