

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
ENGENHARIA MECATRÔNICA

FILIFE ERNESTO SIEGRIST GONÇALVES

ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE COMPONENTES DE POWERTRAIN E  
PARÂMETROS DE PERFORMANCE DOS PRINCIPAIS CARROS ELÉTRICOS DO  
MERCADO

Joinville  
2023

FILIFE ERNESTO SIEGRIST GONÇALVES

ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE COMPONENTES DE POWERTRAIN E  
PARÂMETROS DE PERFORMANCE DOS PRINCIPAIS CARROS ELÉTRICOS DO  
MERCADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica do curso de Engenharia Mecatrônica, da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Orientador(a): Milton Evangelista de Oliveira Filho

Joinville  
2023

Este trabalho é dedicado ao Dr. Paulo Roland Unger, que tanto me ajudou no início de minha vida acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Sou grato primeiramente ao meu Criador, pelo qual todas as coisas subsistem. Em segundo lugar, quero agradecer imensamente às ajudas de meu pai Marcelo e minha mãe Cristina, cada um de seu jeito, me incentivando e me ajudando nos altos e baixos de minha vida acadêmica. Muito obrigado, Vovó Dionete, Oma Ruth e Opa Ernesto (*in memoriam*), pelo porto seguro nos momentos de dificuldade. Agradeço imensamente às ajudas de Eduardo José Batista pelos seus insights que ajudaram em minha pesquisa. E, por fim, quero agradecer ao Prof. Milton, primeiro por ter me apresentado a este Maravilhoso Mundo da Engenharia Mecatrônica, e também pela compreensão quando passei pelo momento mais difícil de minha vida, me guiando e auxiliando neste importante trabalho.

*Soli Deo gloria*

## RESUMO

Este estudo visa analisar os componentes de powertrain em carros elétricos líderes de mercado, com o objetivo geral de comparar esses elementos e suas vantagens e desvantagens. Para atingir este objetivo, foram apresentados os tipos de carros elétricos, seus parâmetros de desempenho e listagens, tanto de componentes de powertrain quanto dos doze modelos de carros elétricos mais relevantes no cenário mundial. Então, foi realizada uma análise detalhada dos componentes destes EVs e seus parâmetros de desempenho. O estudo se justifica pelo fato de que a adoção de veículos elétricos pelas montadoras influencia diretamente sua capacidade de atender às exigências governamentais de redução de emissões de gases de efeito estufa, dada a eficiência energética superior dos veículos elétricos em comparação com os veículos a combustão. A pesquisa, de caráter descritivo, baseia-se em dados secundários, destacando a prevalência de motores síncronos de ímãs permanentes e baterias de íons de lítio nos powertrains estudados. A análise também revela o uso frequente de transmissões diretas em veículos totalmente elétricos e a predominância da tecnologia ECVT em híbridos, contribuindo para compreender as opções de powertrain mais eficazes para diferentes tipos de veículos.

**Palavra-chave:** EVs. Powertrain. Carros Elétricos.

## **ABSTRACT**

This study aims to analyze the powertrain components in leading electric cars in the market, with the general objective of comparing these elements and their advantages and disadvantages. To achieve this goal, the types of electric cars, their performance parameters, and listings of both powertrain components and the twelve most relevant electric car models globally were presented. Subsequently, a detailed analysis of the components of these EVs and their performance parameters was conducted. The study is justified by the fact that the adoption of electric vehicles by automakers directly influences their ability to meet government requirements for reducing greenhouse gas emissions, given the superior energy efficiency of electric vehicles compared to combustion vehicles. The descriptive research is based on data from secondary sources, highlighting the prevalence of permanent magnet synchronous motors and lithium-ion batteries in the studied powertrains. The analysis also reveals the frequent use of direct transmissions in fully electric vehicles and the predominance of ECVT technology in hybrids, contributing to understanding the most effective powertrain options for different types of vehicles.

**Keywords:** EVs. Powertrain. Electric Cars.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Powertrain de um Veículo Elétrico. . . . .	13
Figura 2 – Ilustração dos tipos de Veículos Elétricos em comparação com um Veículo com um Motor a Combustão Interna (ICE). . . . .	16
Figura 3 – Tesla Roadster, um exemplo de BEV. . . . .	17
Figura 4 – O RAV4 é um HEV fabricado pela Toyota. . . . .	19
Figura 5 – Gráfico ilustrando a performance de frenagem de um veículo. . . . .	22
Figura 6 – Gráfico indicando as faixas de consumo de combustível de um veículo com ICE. . . . .	23
Figura 7 – Gráfico de energia gasta na tração e recuperada na frenagem de um EV. . . . .	23
Figura 8 – Perfil de velocidade e aceleração baseado nos padrões europeus de direção. . . . .	24
Figura 9 – Diagrama de um Powertrain de um EV. . . . .	26
Figura 10 – Componentes de Powertrain de em um EV Real. . . . .	27
Figura 11 – Disposição das baterias em um EV. . . . .	28
Figura 12 – Motor CC. . . . .	32
Figura 13 – Ligações do circuito de campo de máquinas CC: (a) excitação independente, (b) em série, (c) em derivação, (d) composta. . . . .	33
Figura 14 – Motor Síncrono. . . . .	34
Figura 15 – Motor de Indução Trifásico. . . . .	35
Figura 16 – Motor BLDC. . . . .	38
Figura 17 – Motor de Relutância Síncrona. . . . .	39
Figura 18 – Conversor de potência do Tesla Model S. . . . .	41
Figura 19 – Motor a Combustão Interna de um HEV. . . . .	42



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores das características de diferentes tipos de bateria. . . . .	31
Tabela 2 – Principais carros elétricos do mercado no primeiro semestre de 2023.	46
Tabela 3 – Motores Elétricos Dianteiros dos principais carros elétricos do mercado. . . . .	48
Tabela 4 – Motores Elétricos Traseiros dos principais carros elétricos do mercado.	48
Tabela 5 – Dados de baterias dos principais carros elétricos do mercado. . . .	50
Tabela 6 – Dados de motores a combustão e transmissão dos principais carros elétricos do mercado. . . . .	51
Tabela 7 – Parâmetros de desempenho dos principais carros elétricos do mercado. . . . .	53
Tabela 8 – Parâmetros de consumo e emissões dos principais carros elétricos do mercado. . . . .	54
Tabela 9 – Parâmetros de autonomia dos principais carros elétricos do mercado.	56

## LISTA DE SIGLAS

BEV Battery Electric Vehicle - Veículo Elétrico a Bateria

BLDC BrushLess Direct Current - Motor Brushless CC

CA Corrente Alternada

CC Corrente Contínua

EV Electric Vehicle - Veículo Elétrico

HEV Hybrid Electric Vehicle - Veículo Elétrico Híbrido

ICE Internal Combustion Engine - Motor a Combustão Interna

NEDC New European Driving Cycle - Novo Ciclo Europeu de Condução

PHEV Plug-in Hybrid Electric Vehicle - Veículo Elétrico Híbrido Plug-In

SRM Synchronous Relutance Machine - Máquina de Relutância Síncrona

WLTP Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure - Procedimento Mundialmente Harmonizado para Testes de Veículos Leves

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	<b>Objetivo geral</b>	<b>13</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
2.1	TIPOS DE CARROS ELÉTRICOS E SUAS DIFERENÇAS	15
2.1.1	<b>Veículos Elétricos a Bateria</b>	<b>16</b>
2.1.2	<b>Veículos Elétricos Híbridos</b>	<b>19</b>
2.2	PARÂMETROS DE PERFORMANCE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	21
2.2.1	<b>Parâmetros de Desempenho do Veículo</b>	<b>21</b>
2.2.2	<b>Parâmetros de Eficiência Energética e Emissões</b>	<b>22</b>
2.2.3	<b>Outros Fatores Relevantes</b>	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>COMPONENTES DE POWERTRAIN</b>	<b>26</b>
3.1	BATERIAS	27
3.2	MOTORES E GERADORES ELÉTRICOS	30
3.2.1	<b>Motores de Corrente Contínua (CC)</b>	<b>31</b>
3.2.2	<b>Motores de Corrente Alternada (CA)</b>	<b>33</b>
3.2.2.1	Motores Síncronos	33
3.2.2.2	Motores de Indução	35
3.2.3	<b>Motores Brushless CC (BLDC)</b>	<b>37</b>
3.2.4	<b>Motores de Relutância Síncrona (SRM)</b>	<b>38</b>
3.3	CONTROLADORES	40
3.4	MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA (ICES)	42
3.5	OUTROS COMPONENTES	43
<b>4</b>	<b>PRINCIPAIS CARROS ELÉTRICOS E SEUS COMPONENTES DE POWERTRAIN</b>	<b>45</b>
4.1	DADOS DOS PRINCIPAIS CARROS ELÉTRICOS DO MERCADO	45
4.1.1	<b>Componentes de Powertrain dos EVs Selecionados</b>	<b>47</b>
4.1.1.1	Motores Elétricos	47
4.1.1.2	Baterias	49
4.1.1.3	Motores à Combustão e Transmissão	51
4.1.2	<b>Dados de Performance dos EVs Selecionados</b>	<b>52</b>
4.1.2.1	Parâmetros de Desempenho	52
4.1.2.2	Parâmetros de Eficiência Energética e Emissões	54
4.1.2.3	Parâmetros de Alcance	56
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>59</b>

**REFERÊNCIAS . . . . . 60**

## 1 INTRODUÇÃO

Os carros elétricos vêm se popularizando cada vez mais nos últimos anos. A Tesla, uma importante fabricante de carros elétricos, tem tido grande destaque na mídia mundial. Curiosamente, o Carro Elétrico não é um conceito novo. Segundo *The Economist* (2019), um em cada três carros produzidos em 1900 era elétrico, mas claramente estes perderam espaço para os carros com motores de combustão interna pois o petróleo era então uma fonte de energia muito mais barata e prática.

Entretanto, nas últimas décadas, há uma crescente demanda por parte dos governos em reduzir as emissões de gases de efeito estufa, e essa redução passa por incentivar a fabricação de veículos mais eficientes, uma vez que os carros são as principais fontes de poluição nos meios urbanos. Para atender a essa demanda, as principais montadoras de carros vêm investindo cada vez mais na fabricação de veículos elétricos.

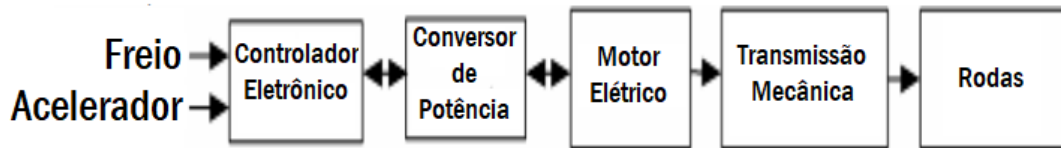
Os veículos elétricos (EVs) são classificados em quatro tipos principais, com base na fonte de eletricidade para a propulsão do veículo. Esses tipos incluem o veículo elétrico a bateria (BEV), o veículo elétrico híbrido (HEV), o veículo elétrico híbrido plug-in (PHEV) e o veículo elétrico a célula de combustível (FCEV) (SINGH *et al.*, 2006 apud VERMA *et al.*, 2021). Cada tipo de EV tem suas próprias características e vantagens em termos de eficiência energética e impacto ambiental.

Embora seja uma ideia promissora, a adoção de FCEVs ainda está longe de ser realizada em larga escala pois falta infraestrutura para abastecer carros movidos a hidrogênio, de acordo com Knauf Industries (2021). Por essa razão, esta classe de veículos não será abordada neste trabalho.

Um dos componentes mais importantes de um veículo elétrico é seu Powertrain, representado na Figura 1, com impacto significativo na eficiência energética do veículo. De acordo com Singh *et al.* (2006), o powertrain é o sistema de propulsão do veículo, que consiste no motor elétrico, no conversor de potência e no controlador eletrônico. O motor elétrico é o componente principal do powertrain e é responsável por converter a energia elétrica armazenada na bateria em energia mecânica para mover o veículo. O conversor de potência é responsável por controlar a quantidade de energia elétrica que é fornecida ao motor elétrico. O controlador eletrônico é responsável por controlar a velocidade e o torque do motor elétrico. A escolha dos tipos de componentes utilizados no powertrain é feita pelo fabricante do EV, com base em fatores como arquitetura, custos e performance desejados.

Comparar os componentes de Powertrain dos principais carros elétricos do mercado mundial justifica-se pela necessidade de redução de emissões de gases poluentes. Assim, é possível notar que a adoção de veículos elétricos por parte das

Figura 1 – Powertrain de um Veículo Elétrico.



Fonte: Adaptado de Singh *et al.* (2006).

montadoras pode impactar, direta ou indiretamente, em sua capacidade de suprir as demandas governamentais para redução de emissões de gases de efeito estufa. Esta redução ocorre pois veículos elétricos, sejam eles do tipo BEV, HEV ou PHEV, são mais energeticamente eficientes comparativamente aos veículos puramente a combustão. Dada a crescente produção de EVs, torna-se relevante realizar um levantamento para identificar os principais fabricantes de carros elétricos e quais as soluções de powertrain por eles adotadas.

A metodologia de desenvolvimento deste trabalho visa levantar os principais tipos de componentes de powertrain disponíveis para veículos elétricos, comparar com os tipos efetivamente utilizados no mercado e identificar quais os tipos mais adequados para os diferentes parâmetros de performance. A abordagem da pesquisa de caráter descritivo será quali-quantitativa, pois levanta os dados de powertrains e realiza comparações de utilização através de fontes secundárias. Entre as fontes estão: levantamentos de vendas de veículos elétricos no mundo, bibliografia técnica de veículos elétricos, artigos científicos sobre o assunto, manuais e outros documentos fornecidos por fabricantes.

## 1.1 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos deste trabalho.

### 1.1.1 Objetivo geral

Analisar as Relações entre Componentes utilizados nos Powertrains dos Principais modelos de Carros Elétricos vendidos no mundo e seus Parâmetros de Performance.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Apresentar os tipos de Carros Elétricos, bem como seus principais parâmetros de performance;
- Listar os tipos e variantes de Componentes utilizados nos Powertrains de veículos elétricos, bem como suas vantagens e desvantagens;
- Listar os principais modelos de carros elétricos vendidos no mundo;

- Analisar os componentes escolhidos para os Powertrains dos modelos de Carros Elétricos listados.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

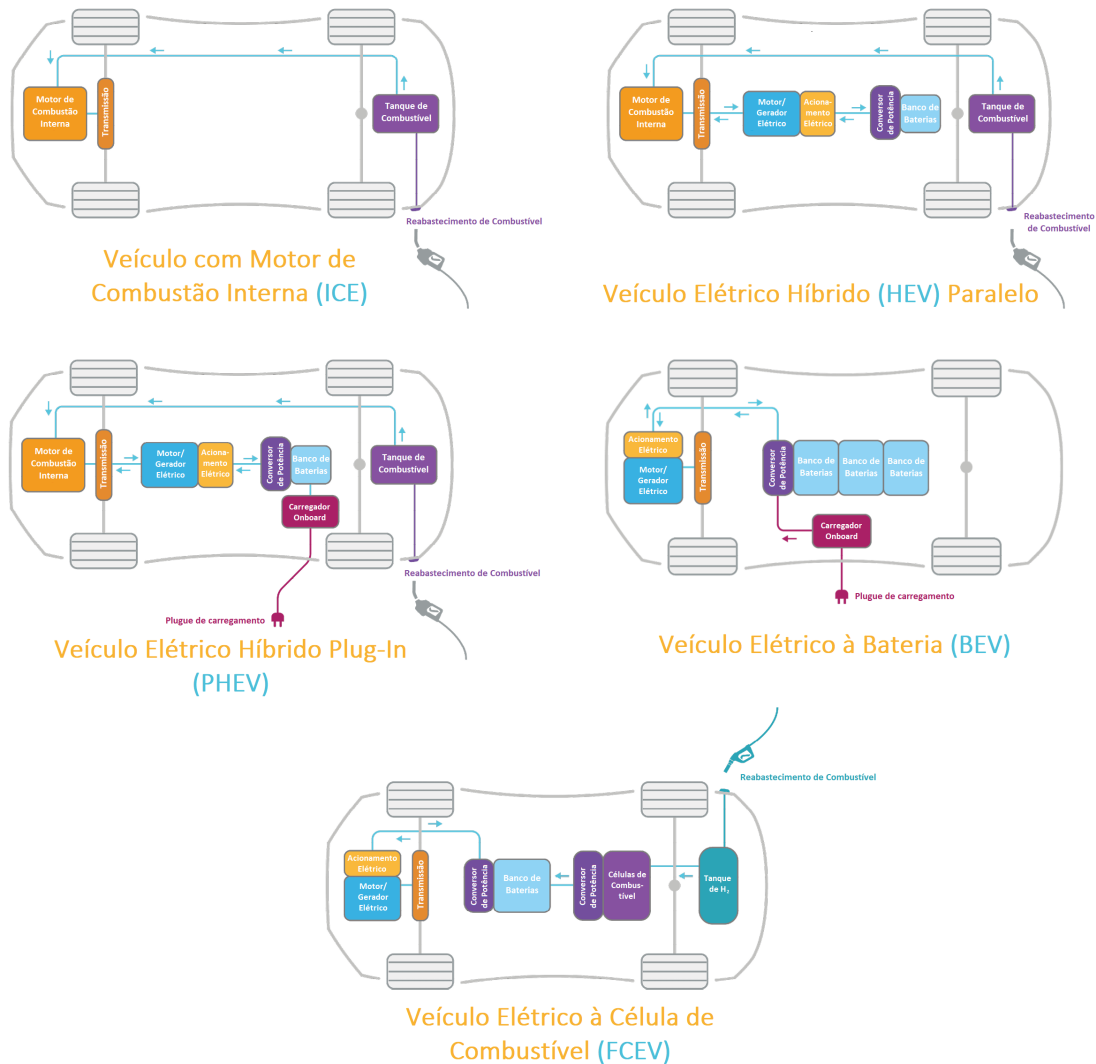
Neste capítulo serão explicados os principais tipos de carros elétricos, com suas vantagens e desvantagens, além dos principais parâmetros de performance que são levados em conta no projeto de um EV.

### 2.1 TIPOS DE CARROS ELÉTRICOS E SUAS DIFERENÇAS

O estudo dos Carros Elétricos faz parte do estudo sobre Veículos Elétricos, que também inclui ônibus, vans e caminhões. Segundo Chan (2002), um Veículo Elétrico (EV) é um veículo rodoviário cuja movimentação envolve algum tipo de propulsão elétrica. Estes podem ser classificados, de acordo com a forma de armazenamento de energia, em: Veículos Elétricos a Bateria (BEVs), Veículos Elétricos Híbridos (HEVs) e Veículos Elétricos com Células de Combustível (FCEVs, que não serão abordados neste trabalho). Denton (2020), por sua vez, divide os HEVs em três tipos: Veículos Elétricos Híbridos Plug-In (PHEVs), Veículos Elétricos de Alcance Estendido (E-REVs) e Veículos Elétricos Puramente Híbridos (HEVs). Um resumo das diferentes arquiteturas de EVs está presente na Figura 2.



Figura 2 – Ilustração dos tipos de Veículos Elétricos em comparação com um Veículo com um Motor a Combustão Interna (ICE).



Fonte: Adaptado de TU Delft OCW (2023b).

Considerando o foco nos Powertrains, a subdivisão entre os tipos de Veículos Elétricos Híbridos fornecida por Denton (2020) não será considerada. Estes serão analisados a partir do ponto de vista mais geral apresentado por Chan (2002). Assim, as principais diferenças entre BEVs e HEVs serão analisadas a seguir.

### 2.1.1 Veículos Elétricos a Bateria

O conceito de um veículo elétrico a bateria (BEV) é simples e mais antigo do que se pensa. Bansal (2005) diz que os BEVs têm uma história muito mais longa

do que a maioria das pessoas imagina. BEVs foram vistos logo após Joseph Henry introduzir o primeiro motor alimentado por corrente contínua em 1830. O primeiro carro elétrico que veio a público foi um pequeno modelo construído pelo Professor Stratingh na cidade holandesa de Groningen em 1835. Já o primeiro BEV construído, foi feito por Thomas Davenport nos EUA em 1834, enquanto que Moses Farmer construiu o primeiro BEV de dois passageiros em 1847.

De acordo com Larminie e Lowry (2012), um BEV possui uma bateria elétrica para armazenamento de energia, um motor elétrico e um controlador. A bateria é normalmente recarregada a partir da eletricidade da rede através de um plugue e uma unidade de carregamento de bateria que pode ser transportada a bordo ou instalada no ponto de carregamento. É geralmente desejável usar frenagem regenerativa tanto para recuperar energia quanto como uma forma conveniente de frenagem sem atrito. Existem vários EVs desse tipo atualmente disponíveis no mercado, desde bicicletas e triciclos elétricos até veículos pequenos para deslocamento diário. Vários fabricantes lançaram EVs comerciais a bateria. Um exemplo de BEV está na Figura 3.

Figura 3 – Tesla Roadster, um exemplo de BEV.



Fonte: Tesla (2023d)

Além disto, os BEVs são também chamados de Veículos com Zero Emissões por não possuírem Motores a Combustão Interna (ICEs) nem sistema de exaustão. Também possuem menos partes móveis em comparação a veículos com motores a combustão interna, o que minimiza a necessidade de manutenção, sem a necessidade de troca de óleo do ICE, por exemplo. BEVs também são mais eficientes por

possuírem apenas Motores Elétricos que são muito mais eficientes e silenciosos que Motores a Combustão interna (BANSAL, 2005).

Outro fator que contribui para a eficiência de um BEV é a capacidade de realizar frenagens regenerativas, utilizando a energia cinética do veículo para recarregar a bateria. Entretanto, esta também é uma vantagem aplicável aos HEVs. Estas vantagens são importantes e devem ser consideradas, principalmente do ponto de vista da eficiência energética. Vale ressaltar, entretanto, que por mais que um BEV não emita gases poluentes por si só, as emissões gerais dependem da forma de geração da energia elétrica utilizada para carregar a bateria.

A partir desta proposta exclusivamente elétrica, observa-se um foco maior em eficiência energética que resulta em economia financeira, constatada através dos aumentos dos preços dos combustíveis fósseis nos últimos anos (Energy Institute Statistical Review of World Energy , 2023 apud Our World in Data, 2023).

Entretanto, esta proposta também possui desvantagens. De acordo com Bansal (2005), a principal limitação dos BEVs é o seu alcance limitado. Os EVs foram superados pelos Veículos a Combustão por possuírem alcance baixíssimo. No início do século XXI, estes tinham autonomia de apenas 50 milhas com um único carregamento. Isso se devia às limitações nas tecnologias de baterias à época. Além disso, o tempo de carregamento de um BEV é consideravelmente maior que o tempo de abastecimento de um veículo a combustão. Apesar dos recentes avanços na tecnologia de baterias, estas continuam sendo o elo fraco, limitando a autonomia dos EVs.

Ehsani *et al.* (2018) acrescenta que o principal motivo para os BEVs não se equipararem a veículos com ICEs em autonomia e performance se deve ao fato da energia ser armazenada em eletrodos cujo peso por energia é muito maior em comparação aos combustíveis fósseis. Ainda assim, Denton (2020) mostra a evolução da autonomia dos veículos elétricos, apresentando uma autonomia estimada de 100 milhas, o dobro da apresentada anteriormente.

Um outro fator também pode ser uma desvantagem: A ausência de ruído do motor elétrico pode ser um desafio para indivíduos com deficiência auditiva, já que eles podem não detectar a aproximação desses veículos, potencialmente aumentando o risco de acidentes. Portanto, os motoristas de BEVs devem estar particularmente alertas e conscientes dessa questão, tomando medidas extras para garantir a segurança no trânsito.

Por mais que os BEVs sejam efetivamente mais eficientes, potencialmente mais baratos e menos poluentes, sua utilização ainda está limitada a aplicações que demandam que o veículo percorra distâncias curtas entre um carregamento e outro como, por exemplo, deslocamentos dentro de cidades.

### 2.1.2 Veículos Elétricos Híbridos

Um conceito alternativo ao BEV é o de Veículo Elétrico Híbrido (HEV). De acordo com Denton (2020), HEVs utilizam pelo menos um motor elétrico, além de um ICE.

Larminie e Lowry (2012) afirmam que um veículo híbrido possui duas ou mais fontes de energia, o que resulta em um grande número de variantes. O tipo mais comum de veículo híbrido combina um ICE com uma bateria e um motor/gerador elétrico. Husain (2003) define um HEV como um veículo em que pelo menos uma das fontes, armazenamentos ou conversores de energia pode fornecer energia elétrica. Um veículo híbrido rodoviário é aquele em que a energia de propulsão durante missões operacionais específicas está disponível a partir de dois ou mais tipos ou tipos de armazenamentos, fontes ou conversores de energia, dos quais pelo menos um armazenamento ou conversor deve estar a bordo. Em resumo, um HEV é um veículo que combina duas ou mais fontes de energia para fornecer propulsão, sendo uma delas capaz de fornecer energia elétrica. O Toyota RAV4, representado na Figura 4, é um exemplo de HEV.

Figura 4 – O RAV4 é um HEV fabricado pela Toyota.



Fonte: Toyota (2023e)

A utilização de HEVs tem se mostrado uma alternativa importante na transição energética. De acordo com Denton (2020), existem três principais objetivos no design de um veículo híbrido: redução do consumo de combustível, redução de emissões e aumento do torque e potência.

A implementação de um sistema híbrido, combinando um motor elétrico e um

ICE, apresenta vantagens significativas. Essa configuração permite que o ICE funcione constantemente em sua faixa de operação ideal, otimizando tanto a eficiência de combustível quanto a produção de torque. Husain (2003) afirma que os HEVs ajudam na mitigação dos desafios relacionados à poluição ambiental e na superação das limitações de alcance associadas aos BEVs. Os HEVs são caracterizados por sua combinação de um motor elétrico e um ICE, proporcionando um alcance estendido e contribuindo para a redução das emissões. Portanto, estes veículos são vistos por muitos como uma solução de curto prazo até que os problemas de limitação de alcance e infraestrutura dos veículos puramente elétricos sejam resolvidos.

Miller (2004) destaca que a adição de torque é uma das principais melhorias de desempenho oferecidas pela hibridização. Como um ou mais motores/geradores elétricos estão presentes no powertrain, é apenas uma questão de ajustar o torque do Motor/Gerador elétrico para coincidir com certos eventos da linha de transmissão, como troca de marcha, partida do veículo, mudança de faixa e manobras de ultrapassagem. A resposta de torque do Motor/Gerador elétrico, particularmente sob controle orientado a campo, é muito mais rápida do que a resposta do ICE e ainda mais rápida do que a resposta do sistema de célula a combustível. Além disso, Ehsani *et al.* (2018) afirmam que os HEVs possuem as vantagens tanto dos veículos a combustão interna quanto dos BEVs.

A partir disto, os HEVs oferecem uma alternativa que combina as características dos veículos a combustão com os veículos a bateria. Eles têm autonomia e desempenho maiores do que os BEVs e são mais econômicos do que os veículos a combustão.

Embora os HEVs ofereçam muitas vantagens, eles também têm suas desvantagens. De acordo com Husain (2003), a complexidade do design do veículo aumenta significativamente com os veículos híbridos, pois são necessários sistemas de controle e suporte para um motor térmico e uma máquina elétrica, além dos componentes necessários para a combinação controlada de energia proveniente das duas fontes.

Além disso, Miller (2004) destaca que os powertrains elétricos híbridos requerem um grande investimento em tecnologia de motor/gerador elétricos e eletrônica de potência. O espaço disponível é extremamente restrito, de modo que mesmo com um design do zero para um híbrido, há muito pouco espaço para colocar máquinas elétricas de 20 a 100 kW, além da eletrônica de potência necessária para acioná-las. Essas máquinas não só devem ter maior densidade de potência, como também devem ser robustas e eficientes. Montar um motor/gerador elétrico no powertrain do veículo significa que o reparo e a substituição exigirá uma desmontagem significativa se um motor/gerador elétrico com falha estiver dentro da transmissão.

Os HEVs demonstram uma maior complexidade em comparação com seus equivalentes totalmente elétricos a bateria. Possuindo ICEs, apresentam uma menor

eficiência e emitem gases de efeito estufa, o que os impede de alcançar a condição de veículos com zero emissões.

## 2.2 PARÂMETROS DE PERFORMANCE DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

A avaliação dos parâmetros de performance é essencial para a escolha correta dos componentes de powertrain em veículos elétricos. Esses parâmetros podem ser afetados pelos componentes escolhidos e, por isso, é importante dividi-los em categorias específicas. Esses parâmetros devem ser levados em consideração durante a escolha dos componentes. Nesta seção, serão apresentados os principais parâmetros de performance de veículos elétricos, organizados em categorias relevantes.

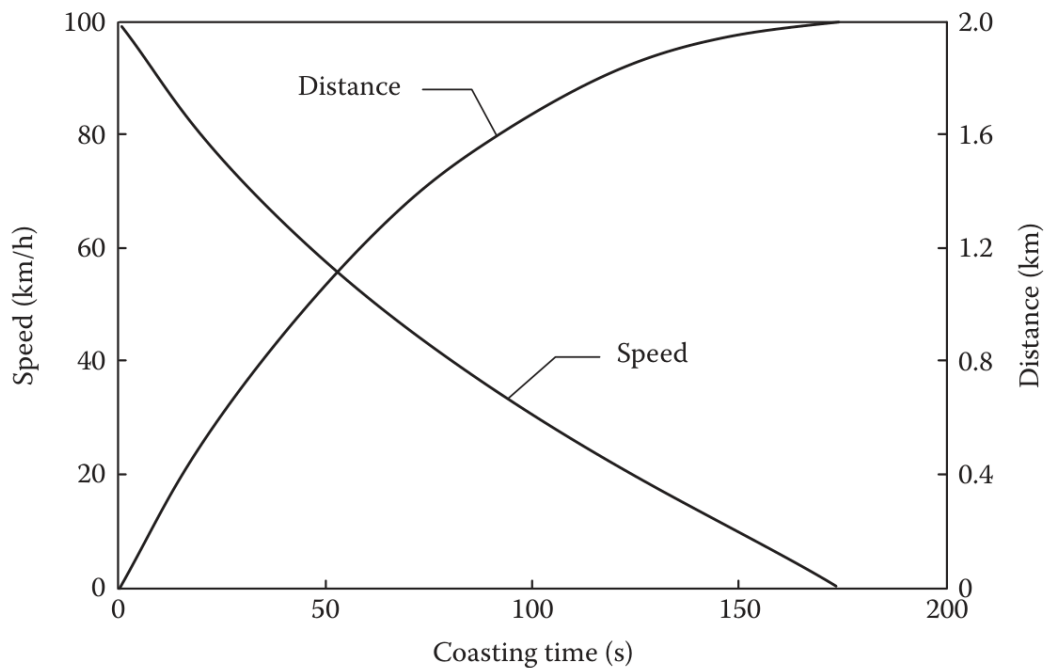
### 2.2.1 Parâmetros de Desempenho do Veículo

De acordo com Ehsani *et al.* (2018), é possível identificar cinco parâmetros-chave utilizados na caracterização do desempenho de veículos elétricos: velocidade, aceleração, rampa máxima de subida, performance de frenagem e recuperação de energia na frenagem.

A velocidade máxima de um veículo é o ponto em que ele pode manter uma velocidade constante em uma estrada plana, com sua capacidade de propulsão em plena carga. A aceleração, por outro lado, representa o tempo e a distância necessários para que o veículo atinja uma certa velocidade (geralmente 100 km/h ou 60 mph) a partir do repouso em terreno nivelado (medida também chamada de 0-100). A rampa máxima de subida descreve a inclinação que o veículo consegue superar a uma velocidade constante, por exemplo, a inclinação que ele pode vencer a 100 km/h (60 mph) (EHSANI *et al.*, 2018).

A performance de frenagem, representada na Figura 5, é uma consideração crítica para a segurança veicular, uma vez que uma parcela substancial da energia consumida em ambientes urbanos está associada à frenagem. A eficiência dessa frenagem também está ligada à capacidade do veículo de recuperar o máximo de energia possível durante esse processo.

Figura 5 – Gráfico ilustrando a performance de frenagem de um veículo.



Fonte: Ehsani *et al.* (2018)

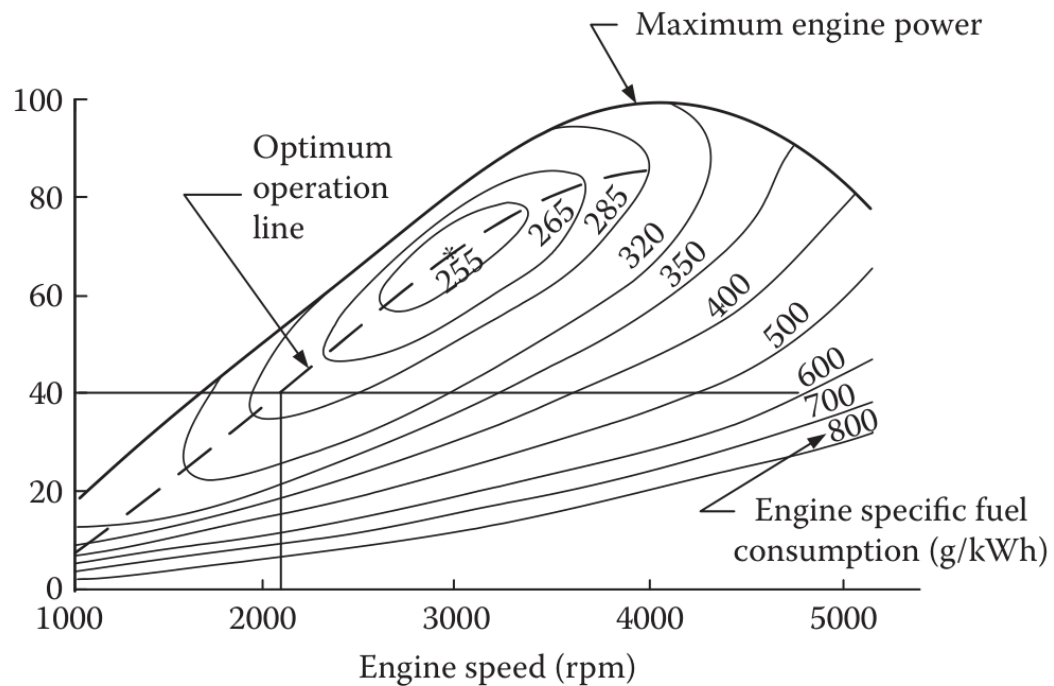
### 2.2.2 Parâmetros de Eficiência Energética e Emissões

Conforme destacado por Ehsani *et al.* (2018), é fundamental considerar a eficiência energética e as emissões no contexto do desempenho dos veículos. Nessa circunstância, três parâmetros essenciais merecem atenção: consumo de combustível, emissões e consumo de energia.

O consumo de combustível, como ponto de partida, refere-se à quantidade de combustível consumida pelo veículo para gerar a energia necessária ao seu funcionamento. É fundamental que o motor opere na região ótima, onde o consumo de combustível é minimizado. O gráfico da Figura 6 exemplifica a região ótima de operação numa curva de Potência por Velocidade.

As emissões, um segundo ponto crítico, englobam os gases e partículas liberados durante o funcionamento do veículo. Essas emissões incluem substâncias tóxicas, como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos não queimados (HCs) e partículas (PM). Frequentemente, a avaliação das emissões se baseia no parâmetro de emissão específica, que expressa a massa de emissão (em gramas) por kWh de saída de trabalho do eixo (g/kWh).

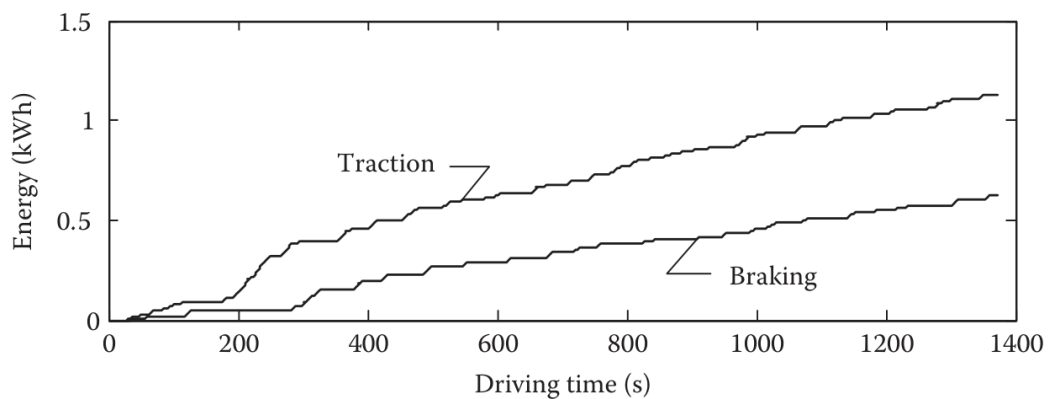
Figura 6 – Gráfico indicando as faixas de consumo de combustível de um veículo com ICE.



Fonte: Ehsani *et al.* (2018)

Por fim, o consumo de energia é a quantidade de energia elétrica ou outra fonte de energia utilizada para movimentar o veículo. Esse consumo é ilustrado pelo gráfico da Figura 7. Assim como o consumo de combustível, é fundamental que o veículo opere de forma eficiente em termos de energia, visando minimizar o consumo de energia durante seu funcionamento.

Figura 7 – Gráfico de energia gasta na tração e recuperada na frenagem de um EV.



Fonte: Ehsani *et al.* (2018)



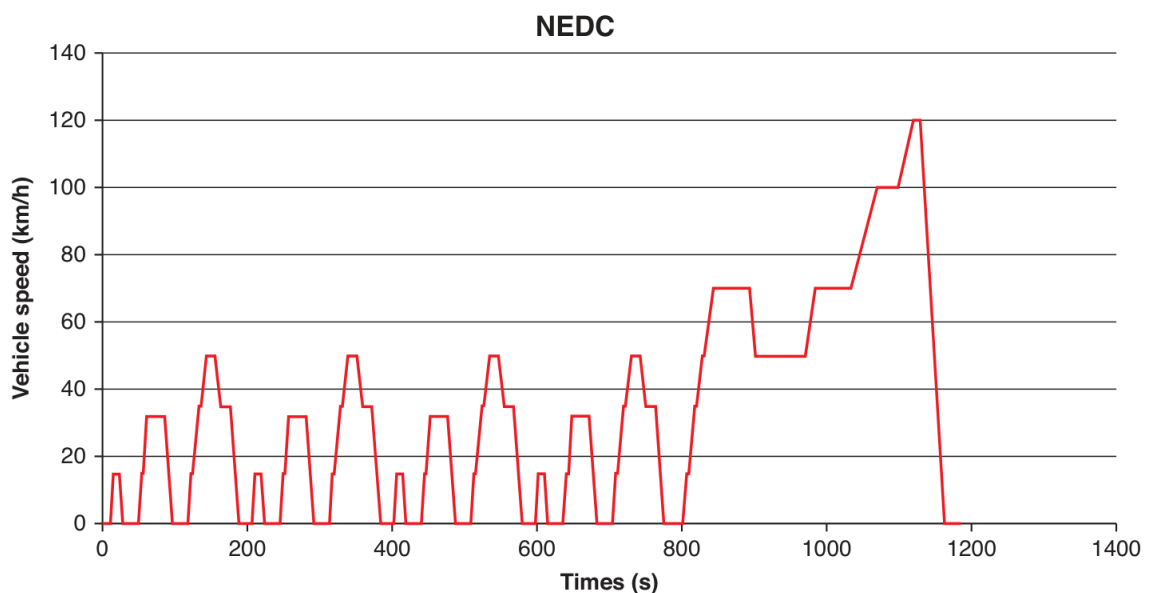
### 2.2.3 Outros Fatores Relevantes

Conforme Larminie e Lowry (2012) enfatizam, diversos fatores desempenham um papel significativo na performance de veículos elétricos. Além dos parâmetros previamente discutidos, outros três aspectos essenciais são o alcance, a missão do veículo e sua complexidade de manutenção.

O alcance, que representa a distância que um veículo pode percorrer com uma única carga de energia, é um fator crucial na definição do desempenho de um veículo elétrico. No entanto, atingir um bom desempenho de alcance pode ser um desafio, especialmente devido à eficiência do armazenamento de energia.

Existem dois tipos principais de avaliação de alcance: No primeiro, uma simulação de velocidade constante, é mais simples e com padrões bem definidos de testes. No segundo tipo, os veículos são guiados em ciclos pré definidos, seguindo perfis fixos de velocidade e aceleração. Esses ciclos simulam padrões de direção variáveis, proporcionando uma base sólida para estimar o alcance em condições do mundo real. Um dos ciclos mais conhecidos, o ciclo LA-4, foi baseado em fluxos de tráfego reais em Los Angeles, proporcionando uma avaliação precisa das emissões. Na Europa, os ciclos tendem a ser mais simples, com períodos de aceleração e velocidades constantes. Um exemplo de ciclo de direção pode ser visto na Figura 8, com seus padrões de velocidade e aceleração específicos.

Figura 8 – Perfil de velocidade e aceleração baseado nos padrões europeus de direção.



Fonte: Denton (2020)

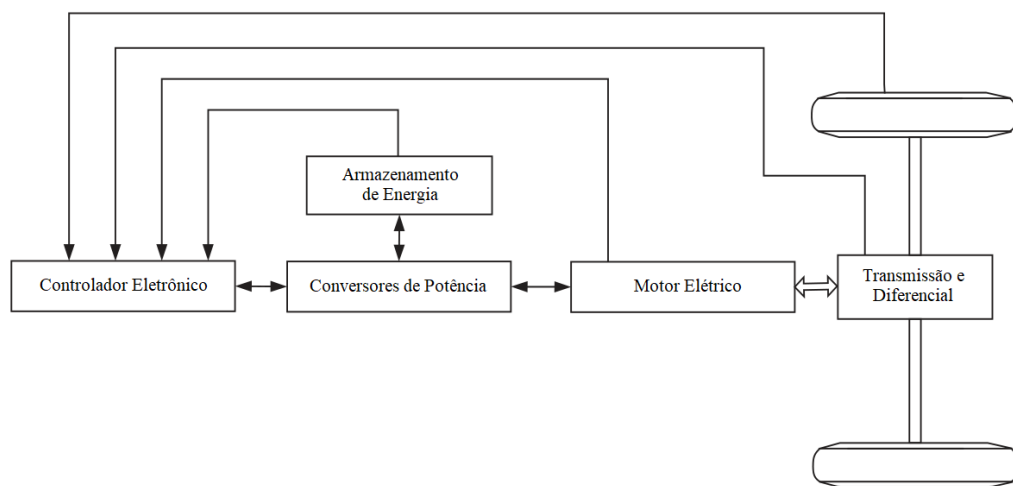
Os padrões de direção destes ciclos dependem diretamente da missão realizada pelo veículo. Assim, veículos com missões diferentes terão perfis de aceleração e velocidade diferentes, o que influencia em outros fatores como, por exemplo, o alcance.

Por último, um fator importante a ser avaliado no projeto de um veículo elétrico é a sua complexidade de manutenção. Miller (2004) enfatiza que a inclusão de um motor/gerador elétrico dentro de um veículo híbrido não é simples, devido ao reduzido espaço, compartilhado com um motor a combustão interna, por exemplo.

### 3 COMPONENTES DE POWERTRAIN

Ambos os tipos de veículos elétricos descritos anteriormente, BEVs e HEVs, compartilham os mesmos componentes básicos em seus powertrains. A principal diferença entre os dois tipos é que o veículo híbrido possui um motor a combustão interna e um sistema mais complexo de transmissão para englobar tanto o motor elétrico quanto o motor a combustão.

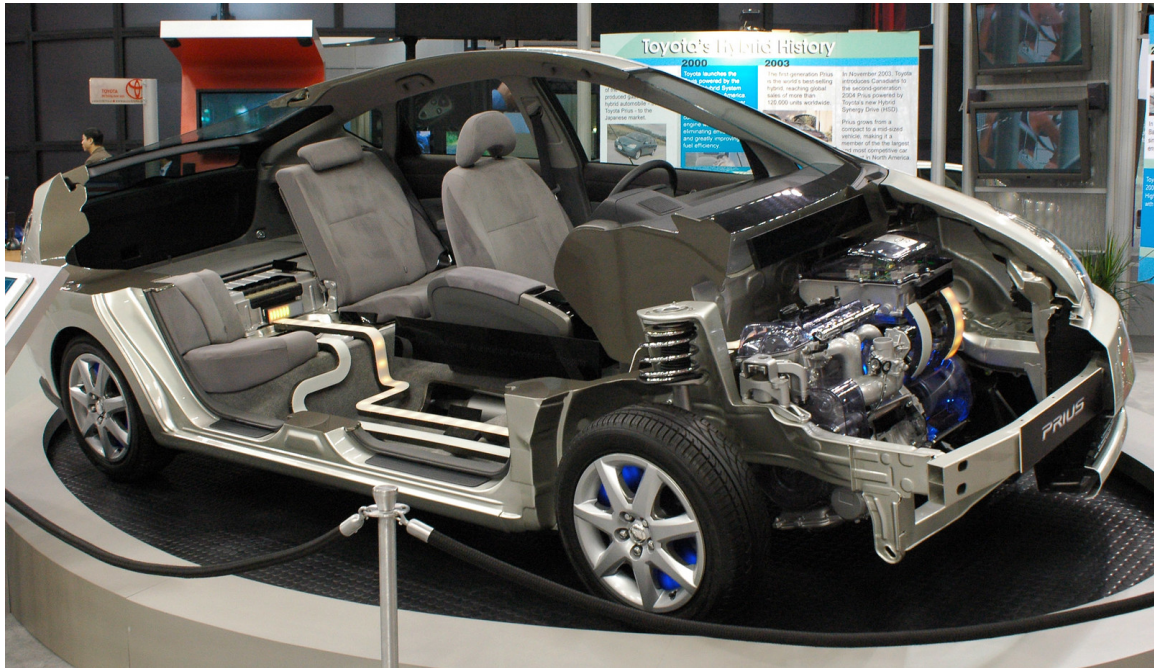
Figura 9 – Diagrama de um Powertrain de um EV.



Fonte: Adaptado de Ehsani *et al.* (2018)

Conforme mostrado na Figura 10, os componentes básicos de um powertrain de veículo elétrico incluem o Controlador Eletrônico, Conversores de Potência, Motor Elétrico, Transmissão e Diferencial e Armazenamento de Energia (em Baterias). A Figura 11 mostra um exemplar de um Toyota Prius, um HEV com os componentes de powertrain expostos de maneira visível num carro real. Estes componentes serão descritos com mais detalhes a seguir.

Figura 10 – Componentes de Powertrain de em um EV Real.



Fonte: D70W7 (2016)

### 3.1 BATERIAS

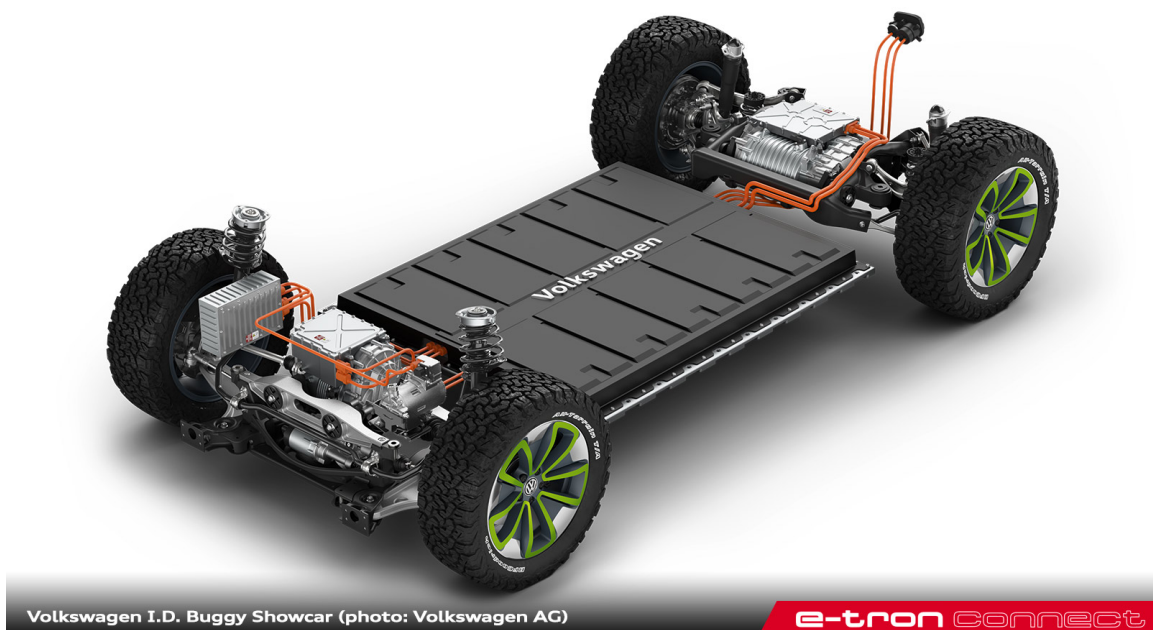
As baterias desempenham um papel central nos powertrains de veículos elétricos, sejam estes BEVs ou HEVs, sendo componentes fundamentais em quase todos os tipos de veículos rodoviários. De acordo com Larminie e Lowry (2012), as baterias são componentes-chave, tanto em termos de custo quanto de peso e volume, especialmente nos BEVs, nos quais a bateria (cuja localização no chassi do EV é apresentada na Figura 11) é a única fonte de armazenamento de energia.

As baterias são constituídas por duas ou mais células elétricas que convertem energia química em energia elétrica. Cada célula é composta por eletrodos positivos e negativos imersos em um eletrólito. O processo de geração de eletricidade ocorre por meio de reações químicas entre esses eletrodos e o eletrólito, resultando na produção de corrente contínua (CC). No powertrain de um EV, as baterias armazenam energia quando o veículo é recarregado e a liberam quando necessário para impulsionar o veículo.

A compreensão do papel central das baterias nos BEVs e HEVs é fundamental para avaliar o desempenho, eficiência e viabilidade desses veículos. As baterias são elementos essenciais para a mobilidade elétrica. A seleção adequada do tipo de bateria é determinante para garantir que o veículo atenderá aos seus requisitos de projeto.

Para atender a estes requisitos, é necessário o entendimento dos parâmetros de funcionamento das baterias. Do ponto de vista do projetista de um EV, a bateria pode ser considerada uma "caixa-preta" que possui uma série de critérios de desempenho. Esses critérios impactam na eficácia e na utilidade da bateria em uma aplicação específica. Neste contexto, Larminie e Lowry (2012) destacam diversos parâmetros que merecem atenção especial na avaliação das baterias de EVs.

Figura 11 – Disposição das baterias em um EV.



Fonte: Audi Club North America (2019)

Estes parâmetros de funcionamento dependem das características físicas e químicas da bateria, além do layout de organização de suas células. Os principais parâmetros que devem ser considerados ao avaliar as baterias de EVs incluem:

- **Tensão das Células e da Bateria:** Todas as células elétricas têm tensões nominais que indicam a tensão aproximada quando a célula está fornecendo energia. É importante entender a tensão das células e como elas são combinadas para formar a tensão total da bateria.
- **Capacidade de Carga:** A capacidade de carga de uma bateria é um dos critérios mais utilizados em sua avaliação. Ela representa a quantidade de carga elétrica que esta pode fornecer antes de precisar ser recarregada. A capacidade de carga é geralmente medida em ampère-hora (Ah), o que significa que uma bateria com uma capacidade de 10 Ah pode fornecer uma corrente de 10 amperes por uma hora. Este valor depende do número de células da bateria, sendo inferido através de seus parâmetros construtivos.
- **Energia Armazenada:** A quantidade de energia armazenada em uma bateria depende da sua tensão e da quantidade de carga armazenada. Essa energia é medida em watt-hora (Wh) e representa a capacidade da bateria de fornecer energia elétrica durante um determinado período. Analogamente à Capacidade de Carga, a energia total é resultado da combinação dos parâmetros construtivos da bateria.
- **Energia Específica:** A energia específica é a quantidade de energia elétrica armazenada para cada quilograma de massa da bateria. Geralmente, é expressa em Wh/kg. Baterias com alta energia específica têm a capacidade de armazenar mais energia em um espaço menor, algo fundamental em veículos elétricos, onde o espaço é limitado.
- **Densidade de Energia:** A densidade de energia representa a quantidade de energia armazenada por unidade de volume da bateria, geralmente expressa em Wh/m<sup>3</sup>. Isso é importante para determinar o tamanho e o peso das baterias em aplicações de EVs.
- **Potência Específica:** A potência específica de uma bateria é a quantidade de potência que ela pode fornecer por quilograma. Ela é medida em watts por quilograma (W/kg) e está relacionada à capacidade da bateria de fornecer energia rapidamente. Baterias com alta potência específica são capazes de acelerar o veículo de forma eficiente.
- **Eficiência de Carregamento:** A eficiência de carregamento de uma bateria indica quanto da energia fornecida durante o processo de recarga é efetivamente armazenada. Essa eficiência é geralmente inferior a 100%, pois parte da energia pode ser perdida na forma de calor durante o processo de recarga.
- **Taxa de Autodescarga:** A taxa de autodescarga é um parâmetro que indica a

taxa com que uma bateria perde carga quando não está em uso. Isso significa que algumas baterias não podem ser deixadas sem recarga por longos períodos de tempo. Geralmente é medida em porcentagem perdida por dia (%/d).

- Ciclos de Vida: Os ciclos de vida de uma bateria indicam ao número de cargas e descargas que fazem sua Capacidade de Carga diminuir significativamente. Sua análise é utilizada para determinar a vida útil da bateria e sua durabilidade ao longo do tempo.

Portanto, compreender esses parâmetros é fundamental para projetar e selecionar as baterias mais adequadas para aplicações de EVs. A capacidade de carga determina a autonomia do veículo, a energia armazenada influencia a distância que ele pode percorrer, a eficiência de carga afeta a eficiência global do sistema, os ciclos de vida determinam a durabilidade da bateria e a tensão é essencial para a operação segura do veículo elétrico. Além disso, uma baixa taxa de autodescarga é importante para garantir que a bateria esteja sempre pronta para uso, especialmente em aplicações críticas de EVs. Compreender esses parâmetros permite que os projetistas escolham as baterias que atendam às necessidades específicas de um veículo elétrico, equilibrando autonomia, eficiência, durabilidade e segurança.

Larminie e Lowry (2012) *apud* Denton (2020) resume os principais tipos de baterias na tabela a seguir. Os principais tipos de baterias, bem como os seus parâmetros de funcionamento estão descritos na Tabela 1, a seguir:

### 3.2 MOTORES E GERADORES ELÉTRICOS

Os motores elétricos, como apontado por Husain (2003), desempenham um papel fundamental tanto em BEVs quanto em HEVs. Eles atuam tanto como motores, convertendo energia elétrica da bateria em energia mecânica para propulsionar o veículo, quanto como geradores, revertendo o processo durante a frenagem regenerativa, convertendo a energia cinética em eletricidade para recarregar a bateria. Seja em um BEV ou HEV, os motores elétricos são responsáveis por essa conversão de energia. Conforme destacado por Ehsani *et al.* (2018), esses motores estão sujeitos a requisitos de operação específicos, incluindo partidas frequentes, paradas, altas taxas de aceleração/desaceleração e uma ampla faixa de velocidades de operação.

De acordo com Bansal (2005), a seleção do tipo apropriado de motor elétrico é de extrema importância para garantir o desempenho ideal de um veículo elétrico. Como observado por Larminie e Lowry (2012), os veículos elétricos podem utilizar uma ampla variedade de motores elétricos, refletindo a diversidade de aplicações e configurações encontradas nesses veículos. Essa versatilidade na escolha do motor é um dos aspectos que tornam os motores elétricos componentes-chave na propulsão de BEVs e HEVs.

Tabela 1 – Valores das características de diferentes tipos de bateria.

Tipo de Bateria	Energia Específica (Wh/kg)	Densidade de energia (Wh/l)	Potência específica (W/kg)	Tensão nominal de célula (V)	Eficiência de carregamento	Taxa de autodescarga (%)	Ciclos de vida até 80%
Chumbo-Ácido	20 - 35	250	250	2.1	80%	2%	800
Níquel-Cádmio (Ni-Cad)	40 - 55	125	125	1.35	Boa	0.5%	1200
Hidreto Metálico de Níquel (Ni-MH)	65	200	200	1.2	Razoavelmente boa	5%	1000
Cloreto de Sódio-Níquel (ZEBRA)	100	150	150	2.5	Muito alta	10% ao dia	>1000
Íon de Lítio (Li-ion)	140	250 - 620	300 - 1500	3.5	Muito boa	10% ao mês	>1000
Ar-Zinco	230	270	105	1.2	Não disponível	Alta	>2000
Ar-Alumínio	225	195	10	1.4	Não disponível	> 10% ao dia mas é muito baixa na ausência de ar	1000
Sódio-enxofre	100	150	200	2	Muito boa	Baixa se mantida quente	1000

Fonte: Adaptado de Larminie e Lowry (2012) *apud* Denton (2020).

### 3.2.1 Motores de Corrente Contínua (CC)

Motores de Corrente Contínua (CC) são um dos tipos de motores elétricos de EVs. De acordo com Umans (2014), essa versatilidade se destaca na capacidade de configurá-los com diferentes enrolamentos de campo, incluindo aqueles excitados em derivação, série ou de forma independente. Essas configurações permitem a criação de uma ampla variedade de características de tensão versus corrente ou de velocidade versus conjugado, tornando os motores CC ideais para aplicações que requerem controle preciso de saída ou uma faixa variável de velocidades. Um exemplo de Motor CC está representado na Figura 12.

Além disso, como enfatizado por Chapman (2013), esses motores desempenham um papel significativo em aplicações veiculares, como carros, tratores e aeronaves, devido à predominância de sistemas elétricos de corrente contínua nesses veículos. Antes do amplo uso de dispositivos eletrônicos de potência, os motores CC eram insuperáveis no controle de velocidade. Este autor categoriza os motores CC em cinco tipos principais: o motor CC de excitação independente, o motor CC em derivação, o motor CC de ímã permanente, o motor CC série e o motor CC composto. Essas variações serão exploradas para compreender suas diferentes características e aplicações.

O motor CC de excitação independente é alimentado por uma fonte de tensão



Figura 12 – Motor CC.



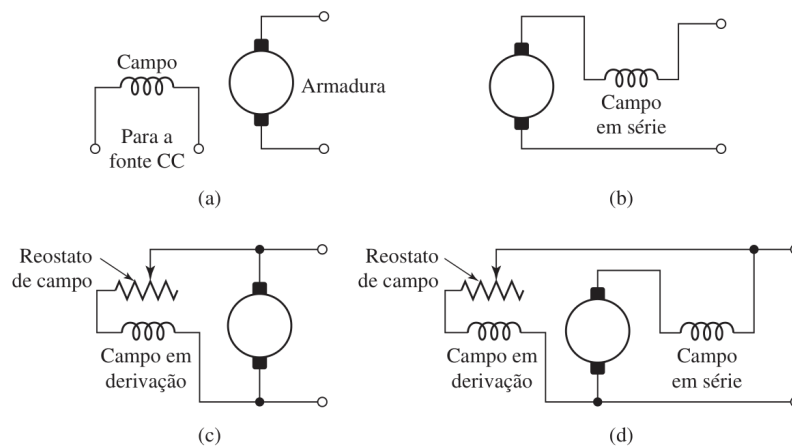
Fonte: Casa do Motor Elétrico (2023)

constante separada para o circuito de campo. Em contraste, o motor CC em derivação, alimentado diretamente a partir dos terminais de armadura do próprio motor, é adequado para aplicações que exigem um controle de velocidade mais amplo e flexível, de acordo com Umans (2014). Os tipos de excitação de campo de um motor CC estão representadas na Figura 13.

Outra variante é o motor CC de ímã permanente, que utiliza polos feitos de ímãs permanentes. Como destacado por Chapman (2013), esses motores são mais simples, eficientes e econômicos do que os motores CC com campos externos devido à eliminação das perdas de cobre no circuito de campo. No entanto, eles podem apresentar menor conjugado por ampère e riscos de desmagnetização.

Os motores CC série, por sua vez, são conhecidos por sua capacidade de fornecer alto conjugado por ampère, tornando-os ideais para aplicações que requerem torque elevado, como motores de arranque de automóveis e motores de elevador. Por fim, os motores CC compostos combinam características de motores em derivação e série, proporcionando um equilíbrio entre o alto conjugado de partida e a estabilidade de velocidade em condições de carga variável.

Figura 13 – Ligações do circuito de campo de máquinas CC: (a) excitação independente, (b) em série, (c) em derivação, (d) composta.



Fonte: Umans (2014)

### 3.2.2 Motores de Corrente Alternada (CA)

Os Motores CA se subdividem em Motores de Indução e Motores Síncronos, que serão explicados detalhadamente a seguir.

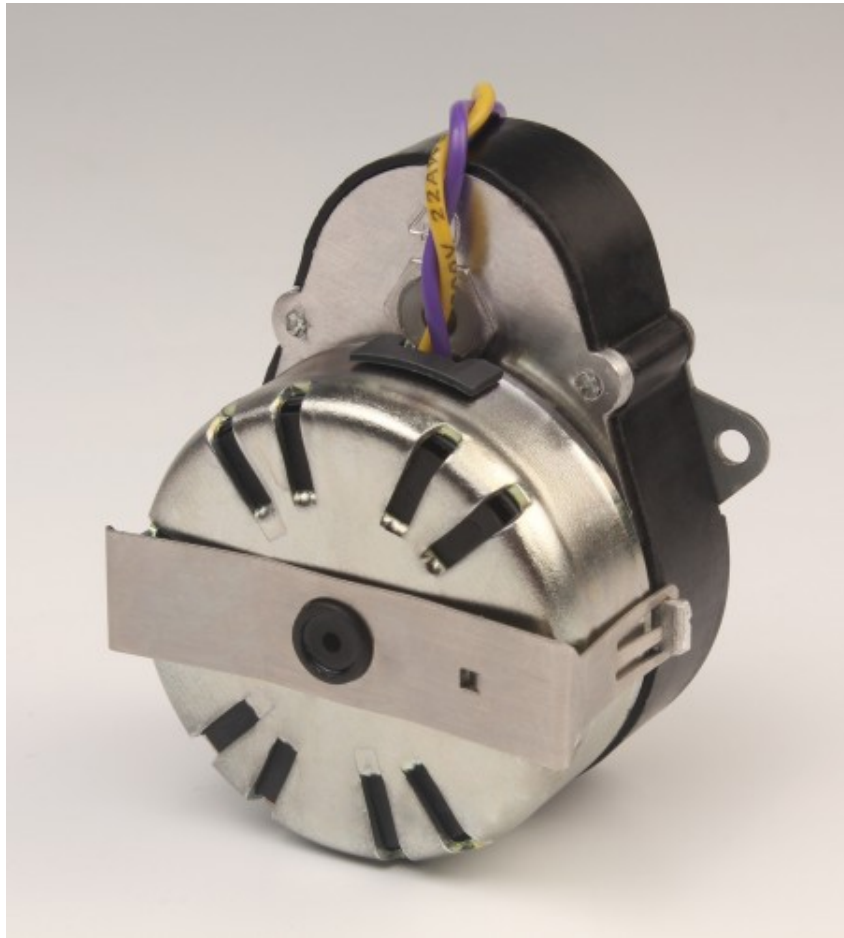
#### 3.2.2.1 Motores Síncronos

Os motores síncronos são máquinas síncronas que desempenham um papel importante na conversão de energia elétrica em energia mecânica. Segundo Chapman (2013) e Umans (2014), eles são caracterizados por receberem a corrente de campo magnético de uma fonte de potência CC separada. O principal traço distintivo dos motores síncronos é que eles operam em sincronismo com a frequência de alimentação, o que significa que a velocidade de rotação do motor é diretamente relacionada à frequência da tensão de alimentação, resultando em um conjugado constante em condições de regime permanente.

Este tipo de motor pode ser utilizado tanto em versões monofásicas quanto trifásicas. Ele oferece características específicas, como a capacidade de operar em sincronia com a frequência da tensão de alimentação, o que pode ser benéfico em certas aplicações.

Esses motores, representados pelo modelo da Figura 14, são frequentemente utilizados em sistemas de potência que possuem geradores de grande porte, e, portanto, sua frequência e tensão de terminal são fixas. Nas máquinas síncronas, a corrente no enrolamento do rotor é fornecida diretamente na parte estacionária do motor através de contatos rotativos. Em resumo, uma máquina síncrona é caracterizada pela corrente alternada no enrolamento da armadura e um fluxo CC no rotor, gerado por excitação CC no enrolamento de campo ou por ímãs permanentes.

Figura 14 – Motor Síncrono.



Fonte: Mechtex (2023)

Um tipo muito importante de motor síncrono são os Motores Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSM), que utilizam ímãs permanentes no rotor. Como mencionado por Husain (2003), esses motores são conhecidos como motores síncronos sem escovas de corrente contínua ou motores síncronos CC de ímã permanente. Eles são notáveis por sua alta eficiência e por possuírem um sistema de resfriamento mais simples de projetar. O uso de materiais magnéticos de terras raras resulta em maior densidade de potência do motor e uma melhor relação entre torque e inércia. No entanto, os ímãs permanentes dos motores PMSM, além de caros, são sensíveis a mudanças de temperatura e variações de carga, o que pode representar uma desvantagem significativa desses tipo de motor.

As máquinas síncronas são uma das opções disponíveis para os sistemas de propulsão de veículos elétricos, cada uma com suas próprias características e aplicabilidades específicas. Portanto, a escolha do tipo de motor depende das necessidades de desempenho e das características desejadas para o veículo elétrico em questão.

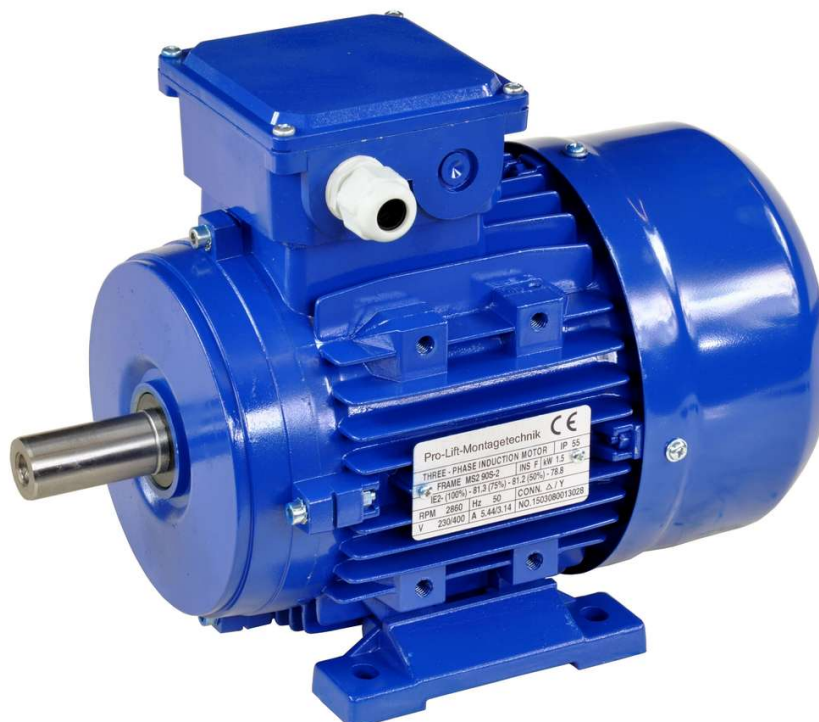
### 3.2.2.2 Motores de Indução

Os motores de indução, também chamados de motores assíncronos, são amplamente utilizados devido à sua maturidade tecnológica. Como destaca Husain (2003), esses motores não requerem uma corrente de campo CC para operar e podem ser monofásicos ou trifásicos, embora a versão monofásica não possua conjugado de partida. Uma característica-chave dos motores de indução é que o rotor gira a uma velocidade ligeiramente inferior à velocidade síncrona, um princípio conhecido como escorregamento.

Existem dois tipos principais de motores de indução, conforme descrito por Husain (2003): motores de gaiola de esquilo e motores de rotor bobinado. Os motores de gaiola de esquilo (como o da Figura 15) são notáveis por sua construção robusta e baixo custo, sendo amplamente utilizados na indústria. Além disso, esse tipo de motor também desperta maior interesse em aplicações de EVs, assim como em outras utilizações de propósito geral.

Por outro lado, o acionamento de motores de indução apresenta maior complexidade em comparação com motores CC. No entanto, o desenvolvimento de técnicas de controle vetorial para acionamentos de motores CA tem simplificado o controle de motores de indução, tornando-o semelhante ao controle de motores CC.

Figura 15 – Motor de Indução Trifásico.



Fonte: Pro-Lift-Montagetechnik (2023)

No contexto de EVs, os motores de indução são promissores devido à sua

construção robusta e simplicidade, como aponta Chapman (2013). A evolução da tecnologia computacional tem melhorado o controle desses motores, tornando-os uma escolha atraente para aplicações de propulsão elétrica em automóveis e outros tipos de EVs.

### 3.2.3 Motores Brushless CC (BLDC)

De acordo com Denton (2020), os Motores Brushless de Corrente Contínua (BLDC), também conhecidos como motores síncronos de ímã permanente com comutação eletrônica, são uma categoria de motores amplamente utilizados na indústria de EVs. Esses motores operam como uma versão híbrida entre motores CA e CC, possuindo características únicas. Diferentemente dos motores síncronos convencionais, os BLDCs incorporam ímãs permanentes no rotor, eliminando a necessidade de anéis deslizantes. Conforme explicado pelo autor, esses motores são capazes de gerar um campo magnético giratório através da comutação eletrônica controlada por sensores de efeito Hall, resultando em um torque eficiente e suave. Essa característica os torna especialmente adequados para aplicações em EVs, onde a eficiência e o controle de velocidade são essenciais.

A simplicidade de controle é uma das principais vantagens dos motores BLDC. Eles requerem apenas seis posições discretas do rotor por revolução elétrica para sincronizar as correntes de fase com as forças magneto motrizes de fase, garantindo uma produção eficaz de torque. Sensores de efeito Hall, geralmente posicionados a  $120^\circ$  um do outro no estator em relação a uma roda magnética fixa no rotor, fornecem facilmente informações sobre a posição do rotor. No entanto, em altas velocidades, pode ser necessário um encoder de alta resolução para avançar as fases. É importante destacar que esses motores operam com forma de onda trapezoidal em suas forças magneto motrizes, o que impede seu controle vetorial (HUSAIN, 2003).

Figura 16 – Motor BLDC.



Fonte: Microinstruments Co. (2023)

Em termos de aplicação em EVs, os motores BLDC (como o modelo da Figura 16) têm se destacado devido ao seu excelente desempenho e alta densidade de potência. Eles oferecem um equilíbrio entre eficiência, controle e tamanho compacto, tornando-os uma escolha atraente para a propulsão elétrica. No entanto, como observado por Husain (2003), eles são ligeiramente maiores do que outros motores devido à presença dos ímãs permanentes, mas essa desvantagem é compensada pelo desempenho superior que oferecem.

### 3.2.4 Motores de Relutância Síncrona (SRM)

Os Motores de Relutância Síncrona (SRMs), conforme descrito por Husain (2003), pertencem a uma categoria especial de motores elétricos. O diferencial desses motores, em comparação com outros tipos, está na composição do rotor e do estator. No SRM, o rotor e o estator são compostos por lâminas de aço magnetizáveis. Essa característica fundamental distingue os SRMs de outros motores, contribuindo para suas propriedades únicas. Além disso, Denton (2020) enfatiza que o SRM não utiliza ímãs permanentes em seu rotor, o que reduz o uso de metais de terras raras, contribuindo para a economia e a sustentabilidade na produção desses motores. A Figura 17 mostra uma foto de um SRM.

Os sistemas de controle para SRMs, como mencionado por Denton (2020), são semelhantes aos utilizados em motores BLDC. Embora os SRMs possam ter um

torque máximo ligeiramente mais baixo, mantêm a eficiência em uma faixa de velocidade e torque muito mais ampla. Husain (2003) destaca várias vantagens dos SRMs, como sua construção simples e de baixo custo devido à ausência de enrolamentos no rotor e ímãs permanentes. Eles também não requerem alimentação por corrente alternada, o que simplifica o projeto de conversores de energia. Os SRMs oferecem alto torque de partida sem um consumo de corrente alto, devido à sua maior auto-indutância. Outras vantagens dos SRMs incluem a capacidade de ajustar facilmente as características de torque e velocidade do motor durante o estágio de design, o que é mais desafiador em máquinas de indução e com ímãs permanentes. Além disso, os SRMs permitem uma temperatura máxima do rotor mais elevada devido à ausência de ímãs permanentes e são capazes de operar em velocidades extremamente altas, oferecendo uma ampla região de potência constante. Outro fator a se notar é que o controle de SRMs tende a ser mais simples em comparação com o controle orientado a campo de máquinas de indução.

Figura 17 – Motor de Relutância Síncrona.



Fonte: MC Motor Technology Co. Ltd. (2023)

Entretanto, é importante notar que estes motores apresentam algumas desvantagens. De acordo com Denton (2020), o timing preciso no acionamento do estator é crucial para o desempenho adequado desses motores, tornando o tempo de comu-



tação um parâmetro crítico. Husain (2003) destaca que, em comparação com motores BLDC, os SRMs tendem a ter perdas no cobre mais elevadas no estator, o que pode resultar em uma eficiência um pouco menor e menor relação de torque por ampere. A necessidade de minimização das ondulações de torque durante a operação aumenta a complexidade de controle deste motor.

Em relação ao seu uso na indústria de veículos elétricos, os SRMs têm se destacado como concorrentes fortes em várias aplicações, como acionamentos de velocidade ajustável e servomotores. Sua simplicidade de construção, ausência de ímãs permanentes e controle eficiente fazem deles uma escolha promissora em EVs, especialmente em cenários onde o custo é um fator crítico. Essas características únicas tornam os SRMs uma opção atraente para a indústria de EVs, oferecendo soluções simples e econômicas.

### 3.3 CONTROLADORES

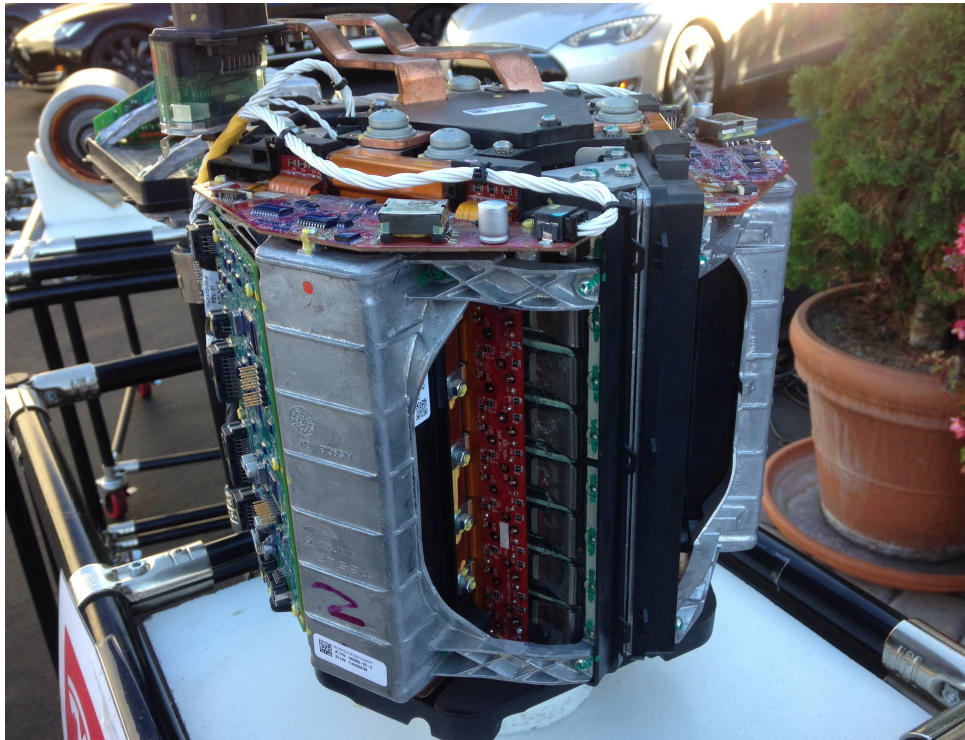
Os conversores de potência desempenham um papel fundamental nos power-trains dos Veículos Elétricos (EVs), sendo muito importantes para otimizar sua eficiência energética. Estes conversores de energia são dispositivos eletrônicos de alta potência construídos com base em componentes semicondutores, que atuam como chaves para ajustar a magnitude e a forma das tensões e correntes entre a entrada e a saída (TU Delft OCW, 2023a).

Conforme destacado por Husain (2003) e Ehsani *et al.* (2018), esses dispositivos são componentes essenciais no sistema de acionamento de um EV, trabalhando em conjunto com controladores para converter a tensão fornecida pela bateria em uma forma adequada para acionar os motores elétricos. Os conversores de potência regulam o fluxo de energia entre a bateria e os motores elétricos, garantindo que a potência seja transmitida de maneira eficaz para impulsionar o veículo. Este controle é essencial para otimizar o desempenho e a eficiência dos motores elétricos em diversas condições de operação, como aceleração, frenagem regenerativa e operação reversa.

Além disso, os dispositivos semicondutores de alta potência utilizados nesses conversores desempenham um papel determinante na eficiência, custo e tamanho desses sistemas. Os requisitos críticos dos sistemas automotivos, como a capacidade de lidar com transientes elétricos, tornam fundamental a seleção de dispositivos de potência com tensões e correntes nominais adequadas. Esses conversores devem garantir que a bateria seja carregada com a tensão correta e que os motores sejam acionados com tensões e correntes adequadas (EHSANI *et al.*, 2018).

A escolha do tipo de conversor de energia depende principalmente do tipo de motor elétrico utilizado no sistema de propulsão. Husain (2003) explica que os conversores de potência podem variar de um acionamento CC que alimenta um motor

Figura 18 – Conversor de potência do Tesla Model S.



Fonte: Lambert (2016)

CC a um acionamento CA que alimenta um motor CA, sendo que os requisitos do acionamento eletrônico de SRMs diferem daqueles de acionamentos CC ou CA. A Figura 18 mostra um Conversor de Potência de um EV (Tesla Model S).

Este autor ainda diz que a integração entre o conversor de energia e o motor elétrico é essencial para o funcionamento do sistema. O comando de entrada do motorista é traduzido em um comando de torque para o acionamento do motor, e esse torque, em conjunto com os sinais de feedback dos sensores, define os parâmetros de ponto de operação para o motor elétrico. Esses parâmetros, por sua vez, controlam o acionamento das chaves de potência dentro do conversor. O motor elétrico, então, recebe energia na tensão e frequência desejadas, resultando no torque e na velocidade necessários para a propulsão do veículo.

TU Delft OCW (2023a) classifica os conversores de potência em quatro tipos principais: conversores CC-CC, conversores CC-CA (inversores), conversores CA-CC (retificadores) e conversores CA-CA. Além disso, esses conversores podem ser bidirecionais, permitindo a transferência de energia nos dois sentidos, ou unidirecionais, e podem ser isolados ou não isolados.

Assim, os conversores de potência são componentes do powertrain elétrico que garantem uma conversão eficiente de energia, atendendo aos requisitos críticos dos sistemas automotivos. Sua escolha depende do tipo de motor elétrico e da necessidade de operação em diferentes modos, sendo essencial para o desenvolvimento de

sistemas de propulsão eficientes e econômicos em EVs.

### 3.4 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA (ICES)

Nos powertrains dos Veículos Elétricos Híbridos, sejam estes HEVs ou PHEVs, tem-se os Motores de Combustão Interna (ICEs), que utilizam a queima de combustíveis tanto para propulsão do veículo quanto, em alguns modelos, para gerar energia elétrica para carregar a bateria. Ehsani *et al.* (2018) destacam que essas máquinas térmicas podem ser categorizadas em Motores de Ignição por Centelha e Motores de Ignição por Compressão, sendo este trabalho focado principalmente nos motores de ignição por centelha, também conhecidos como Motores a Gasolina. Além disso, os ICEs têm sido a escolha predominante como planta motriz para veículos automotores, e essa tendência deve persistir no futuro previsível. Os ICEs estão intrinsecamente ligados à utilização de combustíveis fósseis, mas novas tecnologias estão sendo desenvolvidas para utilizar combustíveis renováveis, como Etanol, Gás Natural Comprimido, Propano e Biodiesel (EHSANI *et al.*, 2018; HUSAIN, 2003). Na Figura 19, encontra-se uma foto de um ICE.

Figura 19 – Motor a Combustão Interna de um HEV.



Fonte: Marsh (2015)

Estes componentes possuem características intrínsecas que influenciam diretamente em seu desempenho e eficiência. Ehsani *et al.* (2018) descrevem que estes

motores são compostos por diversas partes móveis. Uma das características marcantes dos ICEs é sua faixa de operação eficaz limitada, que resulta em variações significativas de torque e potência com a rotação do motor, como destaca Husain (2003). Essas variações, muitas vezes referidas como desempenho de torque ou potência do motor, influenciam no desempenho do veículo. Idealmente, um motor deve operar em uma região ótima de sua faixa de rotação, o que nem sempre é alcançado devido à estreita faixa de operação ótima de um ICE. Além disso, Miller (2004) enfatiza que a eficiência do motor é um fator crítico que influencia diretamente o consumo de combustível do veículo. A operação fora da faixa ideal de rotação do motor pode resultar em aumento no consumo de combustível devido a perdas internas, como bombeamento, atrito e combustão menos eficiente. Portanto, projetar um veículo para operar na região ótima do motor muitas vezes requer o uso de uma caixa de marchas para ajustar a relação entre a rotação do motor e a velocidade do veículo, o que aumenta a complexidade do powertrain (EHSANI *et al.*, 2018; HUSAIN, 2003).

As emissões provenientes dos ICEs são amplamente reconhecidas por seu impacto adverso na qualidade do ar e no meio ambiente. Ehsani *et al.* (2018) destacam que essas emissões tóxicas incluem principalmente monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos não queimados (HCs) e material particulado (PM), resultantes da queima de combustíveis fósseis. Essas emissões variam dependendo das condições de operação do motor. Husain (2003) ressalta que o cumprimento dos padrões de emissão é um desafio significativo, uma vez que os ICEs, presentes em veículos elétricos, são as únicas fontes de poluentes atmosféricos. Portanto, a redução das emissões dos ICEs é fundamental para mitigar o impacto ambiental e melhorar a qualidade do ar.

Outro fator-chave na operação dos ICEs em HEVs é a sua eficiência. Como enfatizado por Miller (2004), esses motores são inerentemente menos eficientes do que os motores elétricos, o que influencia diretamente o consumo de combustível do veículo. Além disso, embora os ICEs tenham sido amplamente empregados em automóveis, com contínuos desenvolvimentos que resultaram em motores que atendem facilmente aos padrões atuais de emissões e economia de combustível, persiste a questão de se será possível atender futuros padrões de emissões e economia de combustível a um custo razoável (HUSAIN, 2003). Assim, conclui-se que um projeto eficaz dos ICEs em HEVs é essencial para a eficiência do veículo e a conformidade com os regulamentos ambientais.

### 3.5 OUTROS COMPONENTES

Os Powertrains dos EVs contam com diversos componentes para converter a energia do motor em movimento das rodas, sendo a transmissão um elemento-chave nesse processo. Esses sistemas variam dependendo do tipo de veículo elétrico. Por

exemplo, os BEVs, que geralmente têm motores elétricos eficientes em uma ampla faixa de velocidades, não requerem transmissões complexas, já que uma única relação de transmissão é suficiente para atender às necessidades de desempenho (EH-SANI *et al.*, 2018).

Em contrapartida, os HEVs, com exceção daqueles que usam a arquitetura de powertrain em série, necessitam de um sistema de transmissão com embreagem e marchas para manter a operação do ICE próxima de sua faixa de rotação ideal, além de acoplar-se ao motor elétrico, visando a eficiência do powertrain (HUSAIN, 2003).

Miller (2004) ressalta que é fundamental considerar que os componentes mecânicos desses sistemas podem resultar em perdas mecânicas que afetam a eficiência global do veículo, como atrito em engrenagens e superfícies de rolamento. Assim, o projeto cuidadoso desses sistemas de transmissão é vital para a integração bem-sucedida do ICE em um sistema híbrido e para otimizar a eficiência global do EV.

## 4 PRINCIPAIS CARROS ELÉTRICOS E SEUS COMPONENTES DE POWER-TRAIN

Para o presente estudo, a análise dos componentes de Powertrain apresentada no capítulo anterior serve como base para o levantamento dos principais carros elétricos disponíveis no mercado. Neste capítulo, uma abordagem técnica será adotada, começando pela metodologia de seleção e descrição dos EVs escolhidos. Em seguida, uma análise detalhada dos componentes de Powertrain essenciais desses veículos será realizada, incluindo os motores elétricos, baterias e conversores, bem como motores a combustão e sistemas de transmissão. Este capítulo permitirá uma investigação aprofundada da tecnologia que impulsiona os carros elétricos atuais, ressaltando suas características distintas, desempenho e impacto no cenário automotivo atual.

### 4.1 DADOS DOS PRINCIPAIS CARROS ELÉTRICOS DO MERCADO

A escolha dos principais Carros Elétricos foi baseada em critérios objetivos, visando representatividade de tecnologias e relevância no mercado. Inicialmente, os veículos foram selecionados com base em seu desempenho de vendas durante o primeiro semestre de 2023, conforme relatado por King (2023) na EV Magazine. Essa revista oferece uma visão confiável do Estado da Arte do Mercado de EVs. Adicionalmente, foram incluídos os dois HEVs mais vendidos no mesmo período, apresentados por Teague (2023) no site Torque News, com base em sua relevância no cenário automotivo, o que reforça sua importância no contexto de EVs. Estes dados de vendas por modelo foram compilados pelo autor na Tabela a seguir.

Tabela 2 – Principais carros elétricos do mercado no primeiro semestre de 2023.

Marca	Carro	Tipo de EV	Vendas 1º Sem. 2023	Preço (US\$)
Toyota	Highlander	HEV	33,422	43,620.00
Toyota	RAV4	HEV	57,208	37,135.00
Volkswagen	ID.4/X/Cross	BEV	87,000	48,995.00
GAC	Aion Y	BEV	92,000	20,360.00
GAC	Aion S/S-Plus	BEV	116,000	28,190.00
Wuling	HongGuang Mini	BEV	122,000	5,320.00
BYD	Qin Plus DM-i	PHEV	149,000	22,710.00
BYD	Dolphin	BEV	159,000	37,366.00
BYD	Yuan Plus/Atto-3	BEV	203,000	22,990.00
BYD	Song Pro/Plus	PHEV	229,000	21,210.00
Tesla	Model 3	BEV	280,000	40,630.00
Tesla	Model Y	BEV	580,000	50,130.00

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

A coleta de dados técnicos para os carros selecionados foi realizada visando garantir a precisão e a confiabilidade das informações. As principais fontes de pesquisa para a obtenção de especificações técnicas foram os sites oficiais dos fabricantes dos EVs. Além disso, outros sites conhecidos por fornecer especificações técnicas detalhadas de carros elétricos também foram utilizados. Dentre essas fontes, destacam-se o site Chinamobil, um repositório de informações de diversos veículos chineses, o EV Database, que oferece uma ampla gama de especificações técnicas de EVs, o Ultimate Specs, que fornece especificações de diversos veículos do mercado, e o Car and Driver, um site especializado em notícias automotivas. Como algumas fontes apresentavam dados de múltiplas variantes, os modelos mais completos e as especificações mais genéricas (englobando tanto os modelos mais baratos quanto os mais caros) foram levantadas.

As informações técnicas dos veículos Highlander e RAV4 foram obtidas dos sites oficiais da Toyota <sup>1</sup>, bem como de outras fontes <sup>2</sup>.

Para o veículo ID.4/X/Cross, os dados técnicos foram obtidos do site oficial da Volkswagen (Volkswagen Media Services, 2021). Informações adicionais foram coletadas em fontes complementares, como EVSpecifications.com (2023a), CarBuzz (2023) e EV Database (2023c). Já no caso do veículo HongGuang Mini, não foi identificado um site oficial da Wuling com informações acessíveis. Portanto, foi necessário recorrer a outras fontes para a coleta de dados, envolvendo a consulta de Kane (2020), Randall (2022), ChinaMobil.ru (2023f) e WinAck Battery Co., Ltd. (2023).

<sup>1</sup> (TOYOTA, 2023d; TOYOTA, 2023a; TOYOTA, 2023b; TOYOTA, 2023c; Toyota Comunica, 2023; TOYOTA, 2023e; TOYOTA, 2023f; Toyota Portugal, 2023; TOYOTA, 2023g)

<sup>2</sup> (Car and Driver, 2023c; EDMUNDS, 2023; Ultimate Specs, 2023d; TOYOTA-CLUB.NET, 2022; Ultimate Specs, 2023e)

Os dados técnicos referentes aos veículos Aion Y e Aion S5-Plus foram obtidos, principalmente, do site oficial encontrado em GAC Jordan (2023), com o apoio de fontes complementares, como Mihalascu (2022), ChinaMobil.ru (2023e), MotorWatt (2023), Tang (2021), ChinaMobil.ru (2023d), InsideEVs (2023), Autocar (2023), ChinaPEV (2023b) e ChinaPEV (2023a).

Quanto aos veículos BYD, representados pelos modelos Qin Plus DM-i, Dolphin, Yuan Plus/Atto-3 e Song Pro/Plus DM-i, as informações técnicas foram coletadas do site oficial da BYD <sup>3</sup> e complementadas por outras fontes relevantes, como Ma (2023), AutoCatalogArchive (2021), CMS-Comerciales (2023), ChinaMobil.ru (2023a), Autoelectro (2023), EV Database (2023a), ArenaEV (2023), Ouz (2022), AutoElectro (2023), ChinaMobil.ru (2023b), ChinaMobil.ru (2023c), Ultimate Specs (2023a), Auto-Data.net (2023), Lira (2023), Motoreu (2023), Licarco (2023) e Lee (2021).

Por fim, as informações técnicas dos veículos Model 3 e Model Y foram adquiridas do site oficial da Tesla <sup>4</sup> e complementadas por dados de outras fontes, como Ultimate Specs (2023c), Ultimate Specs (2023b), Car and Driver (2023a), Car and Driver (2023b) e diversas outras <sup>5</sup>.

Esta coleta de dados técnicos dos EVs selecionados fornece uma base sólida para análises subsequentes. A obtenção de informações precisas dos sites oficiais dos fabricantes destes carros e de outras fontes confiáveis visa garantir a integridade das especificações técnicas coletadas. Os dados serão agora apresentados e analisados em detalhes, visando uma compreensão aprofundada do desempenho e das características de cada veículo, bem como a realização de comparações entre os componentes de powertrain selecionados.

#### **4.1.1 Componentes de Powertrain dos EVs Selecionados**

Com base na revisão teórica realizada anteriormente, serão analisados os componentes de Powertrain utilizados nos EVs escolhidos. A análise foi subdividida entre Motores Elétricos, Baterias e Motores a Combustão e Transmissão para entender melhor as escolhas realizadas pelas montadoras.

##### **4.1.1.1 Motores Elétricos**

A análise dos motores elétricos utilizados nos 12 carros listados revela uma variedade de configurações e características. Os principais aspectos desses motores serão examinados, considerando seu tipo, potência e torque, bem como a presença de motores traseiros em alguns veículos. Os dados de motores dianteiros estão na Tabela 3, a seguir.

<sup>3</sup> (BYD Brasil, 2023; BYD Auto Brasil, 2023a; BYD Auto Brasil, 2023c; BYD Auto Brasil, 2023b)

<sup>4</sup> (TESLA, 2023b; TESLA, 2023a; TESLA, 2023c)

<sup>5</sup> (EVSpecifications.com, 2023b; EVSpecifications.com, 2023c; EV Database, 2023b)



Tabela 3 – Motores Elétricos Dianteiros dos principais carros elétricos do mercado.

Carro	Tipo de EV	Tipo do Motor Elétrico Dianteiro	Torque do Motor Dianteiro (N.m)	Potência do Motor Dianteiro (kW)
Highlander	HEV	CA Síncrono de Ímãs Permanentes	Não Encontrado	123
RAV4	HEV	CA Síncrono de Ímãs Permanentes	202	88
ID.4/X/Cross	BEV	CA de Indução	160	80
Aion Y	BEV	CA Síncrono de Ímãs Permanentes	225	135
Aion S1S-Plus	BEV	CA Síncrono de Ímãs Permanentes	300	135
HongGuang Mini	BEV	N/A	N/A	N/A
Qin Plus DM-i	PHEV	CA Síncrono de Ímãs Permanentes	250	110
Dolphin	BEV	CA Síncrono de Ímãs Permanentes	180	70
Yuan Plus/Atto-3	BEV	CA Síncrono de Ímãs Permanentes	310	150
Song Pro/Plus	PHEV	CA Síncrono de Ímãs Permanentes	316	145
Model 3	BEV	CA de Indução	163	158
Model Y	BEV	CA de Indução	163	158

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

Quanto aos motores traseiros, os dados coletados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Motores Elétricos Traseiros dos principais carros elétricos do mercado.

Carro	Tipo de EV	Tipo do Motor Elétrico Traseiro	Torque do Motor Traseiro (N.m)	Potência do Motor Traseiro (kW)
Highlander	HEV	CA Síncrono de Ímãs Permanentes	Não Encontrado	50
RAV4	HEV	CA Síncrono de Ímãs Permanentes	121	40
ID.4/X/Cross	BEV	Brushless CC	310	150
Aion Y	BEV	N/A	N/A	N/A
Aion S1S-Plus	BEV	N/A	N/A	N/A
HongGuang Mini	BEV	CA Síncrono de Ímãs Permanentes	85	20
Qin Plus DM-i	PHEV	N/A	N/A	N/A
Dolphin	BEV	N/A	N/A	N/A
Yuan Plus/Atto-3	BEV	N/A	N/A	N/A
Song Pro/Plus	PHEV	CA Síncrono de Ímãs Permanentes	280	120
Model 3	BEV	CA de Relutância Síncrona com Ímãs Permanentes	330	208
Model Y	BEV	CA de Relutância Síncrona com Ímãs Permanentes	Não Encontrado	220

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

No que diz respeito ao tipo de motor elétrico dianteiro, observa-se que a maioria dos veículos, especialmente os híbridos (HEVs e PHEVs), faz uso de motores de Corrente Alternada (CA) Síncronos de Ímãs Permanentes. Esse tipo de motor é conhecido por sua eficiência e desempenho geral. Os modelos Song, Highlander, ID.4 e Model Y, apesar de serem mais pesados, são equipados com motores dianteiros de potência e torque consideráveis. Além disso, para assegurar um equilíbrio adequado, esses veículos incorporam motores traseiros que acompanham essa mesma característica. É importante também notar, por parte do Volkswagen ID.4, a utilização de motores de indução no eixo dianteiro.

O veículo RAV4 destaca-se com um torque dianteiro de 202 Nm e uma potência de 88 kW. Esses valores indicam um motor dianteiro capaz de fornecer uma excelente aceleração e desempenho. No entanto, vale destacar que, no caso do modelo Highlander, não foram encontradas informações sobre o torque do motor dian-

teiro, mas a potência foi listada como 123 kW, sugerindo uma configuração de alto desempenho.

Agora, considerando os motores traseiros, observa-se que nem todos os veículos possuem essa configuração. Os modelos Qin Plus DM-i, Dolphin, Yuan, Aion Y e Aion S, por exemplo, possuem tração dianteira, o que significa que há apenas um motor dianteiro usado para a propulsão. Por outro lado, o veículo HongGuang Mini apresenta tração traseira, em que há somente um motor traseiro responsável pela propulsão. O Volkswagen ID.4, por exemplo, além de seu motor dianteiro, utiliza um motor de sem escovas CC, que oferece um torque adicional de 310 Nm e uma potência adicional de 150 kW. Isso contribui para um desempenho impressionante, adequado para um veículo totalmente elétrico.

Já os veículos da Tesla, Model 3 e Model Y, destacam-se por adotarem motores de Indução no eixo dianteiro, com torque de 163 N.m e 158 kW de potência máxima, e motores de Relutância Síncrona com Ímãs Permanentes no eixo traseiro, resultando em uma configuração de motorização dupla que contribui para uma distribuição eficaz de potência e torque em todas as rodas, conferindo desempenho excepcional e capacidade de aceleração notáveis. Tal característica é particularmente relevante em veículos mais pesados, onde o equilíbrio entre os eixos dianteiro e traseiro é importante na otimização da dinâmica de condução.

Esses dados ressaltam a importância da configuração do powertrain de um veículo elétrico, que pode variar significativamente entre os modelos. Os motores dianteiros mais potentes, encontrados nos veículos mais pesados, como Song, Highlander, ID.4 e Model Y, demonstram a necessidade de maior potência para lidar com veículos mais massivos. Por outro lado, o HongGuang Mini, sendo o menor dos veículos, não requer um motor tão potente, necessitando apenas 20 kW de potência máxima em sua tração traseira.

Observa-se também uma ampla adoção de Motores Síncronos de Ímãs Permanentes, devido à sua elevada densidade de potência, o que possibilita uma instalação eficiente em espaços limitados, como os encontrados em veículos automotivos.

Globalmente, os motores elétricos desempenham um papel fundamental no desempenho e eficiência dos veículos elétricos. A escolha de motores síncronos de ímãs permanentes e motores de indução demonstra a busca por eficiência e desempenho.

#### 4.1.1.2 Baterias

Ao analisar os motores elétricos dos EVs, conforme discutido anteriormente, é essencial abordar também as baterias e conversores de potência utilizados nesses veículos, pois esses componentes são responsáveis pela geração e gestão da energia

de tração que alimenta seus motores elétricos. Os dados foram compilados na tabela 5.

Tabela 5 – Dados de baterias dos principais carros elétricos do mercado.

Carro	Tipo de EV	Tipo de Bateria	Capacidade (kWh)	Tipos de Conversores de Potência
Highlander	HEV	NiMH	1,9	CC/CA
RAV4	HEV	NiMH ou Li-ion	1,6 NiMH ou 0,9 Li-ion	CC/CA
ID.4/X/Cross	BEV	Li-ion	77,0	CC/CA e CC/CC
Aion Y	BEV	Li-ion	58,8	CC/CA
Aion S1S-Plus	BEV	Li-ion	58,8	CC/CA
HongGuang Mini	BEV	Li-ion	13,9	CC/CA
Qin Plus DM-i	PHEV	Li-ion	13,0	CC/CA
Dolphin	BEV	Li-ion	44,9	CC/CA
Yuan Plus/Atto-3	BEV	Li-ion	60,5	CC/CA
Song Pro/Plus	PHEV	Li-ion	18,3	CC/CA
Model 3	BEV	Li-ion	60,0	CC/CA
Model Y	BEV	Li-ion	60,0	CC/CA

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

A escolha da tecnologia de bateria é um dos principais diferenciais, com alguns veículos utilizando baterias de Níquel Metal Hidreto (NiMH) e a maioria adotando baterias de Íons de Lítio (Li-ion). Observa-se que HEVs como o Toyota Highlander fazem uso de baterias NiMH, embora o RAV4, do mesmo fabricante, possa ser equipado com baterias Li-ion. Esse tipo de bateria é amplamente adotado em BEVs devido à sua alta densidade de energia e capacidade de armazenamento.

As capacidades das baterias variam consideravelmente, refletindo as diferentes demandas de energia dos veículos. Os BEVs geralmente possuem baterias maiores, com capacidades que variam de 44,9 kWh a 60,48 kWh, enquanto os HEVs, que dependem menos da bateria para a propulsão, apresentam capacidades de bateria significativamente menores, variando de 0,9 kWh a 1,9 kWh. Os veículos híbridos PHEVs tendem a se situar entre esses extremos em termos de capacidade de bateria. Isso está em conformidade com a lógica de que um veículo que se baseia principalmente em sua fonte de combustão interna para a propulsão requer uma bateria menor.

A discussão sobre os conversores de potência utilizados nos veículos é mais limitada devido à falta de dados disponíveis. No entanto, com base no conhecimento de que as baterias funcionam em corrente contínua (CC) e considerando o tipo de corrente de alimentação dos motores elétricos, foi possível inferir que os veículos utilizam conversores de potência CC/CA ou CC/CC bidirecionais. Os conversores de potência são componentes essenciais pois adaptam a corrente da bateria ao motor elétrico, permitindo um controle preciso de aceleração e um funcionamento eficiente.

Além disso, as diferenças de peso e tamanho entre os veículos influenciam diretamente a escolha da capacidade da bateria. Os veículos maiores, como o ID.4, Model Y, Song e o Highlander, requerem baterias com capacidades maiores devido à maior demanda de energia para propulsão. No entanto, vale ressaltar que o Highlander é um HEV, e seu motor elétrico não é a principal fonte de propulsão. Por outro lado, o HongGuang Mini, um veículo mais leve voltado para o ambiente urbano, não necessita de uma bateria tão grande devido às suas características de uso e menor demanda energética.

Essas considerações sobre a escolha das baterias e seus tamanhos em relação aos tipos de veículos destacam a importância de selecionar a tecnologia e a capacidade de bateria adequadas para atender às necessidades de cada aplicação. A partir desta análise, percebe-se uma busca, da parte dos fabricantes, por um equilíbrio entre autonomia, eficiência e desempenho para otimizar o funcionamento destes carros, o que demonstra a criticidade desta decisão feita pelas montadoras.

#### 4.1.1.3 Motores à Combustão e Transmissão

Os carros híbridos, abrangendo tanto híbridos puros (HEVs) quanto híbridos plug-in (PHEVs), apresentam uma configuração de powertrain mais complexa. Isso se deve à combinação de motores elétricos e motores a combustão interna, utilizados em sua propulsão. Os motores a combustão são responsáveis por fornecer energia adicional, juntamente com os motores elétricos, em alguns casos, para a propulsão dos veículos híbridos. Objetivando a comparação entre as soluções adotadas por estes veículos, foram levantados os dados dos motores a combustão e características de transmissão dos EVs listados, conforme descrito na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados de motores a combustão e transmissão dos principais carros elétricos do mercado.

Carro	Tipo de EV	Possui Motor a Combustão?	Torque Máx (N.m)	Potência Máx (hp)	Tamanho do tanque de Combustível (l)	Tipo de transmissão	Nº de Marchas
Highlander	HEV	Sim	237	186	67,8	ECVT	1
RAV4	HEV	Sim	221	176	55,0	ECVT	1
ID.4X/Cross	BEV	Não	N/A	N/A	N/A	Single Speed	1
Aion Y	BEV	Não	N/A	N/A	N/A	Single Speed	1
Aion SIS-Plus	BEV	Não	N/A	N/A	N/A	Single Speed	1
HongGuang Mini	BEV	Não	N/A	N/A	N/A	Single Speed	1
Qin Plus DM-i	PHEV	Sim	240	152	50,0	ECVT	1
Dolphin	BEV	Não	N/A	N/A	N/A	Single Speed	1
Yuan Plus/Atto-3	BEV	Não	N/A	N/A	N/A	Single Speed	1
Song Pro/Plus	PHEV	Sim	231	139	60,0	ECVT	1
Model 3	BEV	Não	N/A	N/A	N/A	Single Speed	1
Model Y	BEV	Não	N/A	N/A	N/A	Single Speed	1

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

Nesse contexto, a distinção entre essas duas categorias de veículos é evidenciada pelos dados apresentados. HEVs, como o Highlander e o RAV4, possuem motores a combustão mais potentes, com um torque máximo de 237 N.m e 221 N.m,

respectivamente. Além disso, observa-se que o tamanho dos tanques de combustível é relativamente semelhante entre os veículos híbridos, o que sugere uma uniformidade nessa característica, independentemente de serem Plug-ins ou não.

Enquanto os BEVs utilizam transmissões diretas com uma única marcha (ou sem marchas), os híbridos, sejam eles HEVs ou PHEVs, empregam transmissões do tipo ECVT. A utilização de uma única marcha nos BEVs é uma escolha eficaz devido à capacidade dos motores elétricos de operarem eficientemente em uma ampla faixa de velocidades, o que simplifica o sistema de transmissão. Em contrapartida, a transmissão ECVT é uma opção comum para os HEVs e PHEVs, uma vez que, desenvolvida para superar as limitações das transmissões automáticas convencionais, proporciona uma operação suave e respostas rápidas, garantindo ao mesmo tempo um tamanho compacto da caixa de transmissão (SAKAI, 1988).

Quanto aos PHEVs, como o Qin Plus DM-i e o Song Pro/Plus, também possuem motores a combustão interna (ICEs), embora menos proeminentes, pois sua operação é mais voltada para os motores elétricos. Isso possibilita que esses veículos utilizem motores a combustão menos potentes em comparação com os HEVs mencionados anteriormente, sendo que são menos dependentes dos ICEs.

A partir dos dados analisados, é possível notar uma tendência de otimização dos sistemas de motor e transmissão na Indústria de Carros Elétricos. Essas escolhas criteriosas de componentes e tecnologias evidenciam o compromisso das montadoras em desenvolver soluções mais eficazes e robustas.

#### **4.1.2 Dados de Performance dos EVs Selecionados**

Nesta seção, serão apresentados os dados de desempenho dos carros elétricos analisados neste estudo. Os parâmetros essenciais, como velocidade máxima, aceleração, autonomia e outras métricas relevantes, serão abordados com o objetivo de compreender as características de desempenho de cada veículo, suas variações e como esses fatores se relacionam com os componentes de powertrain utilizados.

##### **4.1.2.1 Parâmetros de Desempenho**

Inicialmente foram analisados os parâmetros de desempenho dos EVs, listados na tabela a seguir. Os valores de torque máximo e potência máxima foram calculados através da soma dos valores individuais de cada motor de cada veículo. Esta é uma medida aproximada pois desconsidera fatores como picos de potência em rotações diferentes para cada componente. Mas serve com uma boa estimativa de potência global dos carros. Os dados foram compilados na Tabela 7.

A análise dos parâmetros de desempenho dos veículos elétricos revela uma diversidade de características, influenciadas por fatores como a potência, torque e tipo de motorização. Quanto à motorização, percebe-se que os motores de indução

Tabela 7 – Parâmetros de desempenho dos principais carros elétricos do mercado.

Carro	Tipo de EV	Peso vazio (kg)	Potência Máxima (kW)	Torque Máximo (N.m)	Velocidade Máxima (km/h)	0 - 100 km/h (s)
Highlander	HEV	1979,9	179	270	180	8,3
RAV4	HEV	1755,0	259	544	180	6,2
ID.4/X/Cross	BEV	2116,0	230	470	180	6,7
Aion Y	BEV	1745,0	135	225	130	8,7
Aion S\S-Plus	BEV	1625,0	135	300	156	6,8
HongGuang Mini	BEV	705,0	20	85	100	N/A
Qin Plus DM-i	PHEV	1720,0	222	490	185	5,9
Dolphin	BEV	1405,0	70	180	150	7,0
Yuan Plus/Atto-3	BEV	1700,0	150	310	160	7,3
Song Pro/Plus	PHEV	1975,0	367	827	180	7,7
Model 3	BEV	1659,0	366	493	225	6,1
Model Y	BEV	2066,1	378	527	217	5,1

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

predominam nos veículos mais potentes, enquanto os motores síncronos de ímãs permanentes são mais comuns em modelos menos potentes. A presença de tração nas quatro rodas (motorização tanto no eixo frontal quanto no eixo traseiro) está associada aos carros mais potentes, embora a relação entre o tipo de veículo elétrico (BEV, HEV ou PHEV) e os valores totais de torque e potência não seja tão evidente.

Alguns modelos se destacam na aceleração, como o Tesla Model Y, que atinge 0-100 km/h em 5,1 segundos, enquanto outros, como o HongGuang Mini, têm um desempenho mais modesto. Além disso, os Teslas apresentam a maior velocidade máxima, atingindo 217 km/h no Model Y, demonstrando um desempenho superior, embora isso venha com um custo mais elevado.

Outro fator significativo nos parâmetros de desempenho é o peso do veículo, que varia consideravelmente. O peso geralmente está associado ao tamanho da bateria, sendo mais pesado nos veículos com baterias maiores. Também está relacionado com o tipo de motorização. Conforme visto anteriormente, powertrains híbridos são maiores e mais complexos que os equivalentes com motores elétricos somente.

Como resultado, veículos como o HongGuang Mini, que possui uma bateria menor e um motor menos potente, tendem a ser mais leves, o que influencia diretamente seu desempenho. As baterias maiores também desempenham um papel fundamental na autonomia, tornando os veículos mais capazes de percorrer distâncias mais longas com uma única carga. É notada a importância da harmonia entre a capacidade da bateria, tipo de motorização, peso do veículo e seus parâmetros de desempenho.

No entanto, é importante ressaltar que o desempenho não é o único fator determinante na escolha de um veículo elétrico, já que diferentes missões de uso podem exigir características variadas. Portanto, a análise dos parâmetros de desempenho destaca a importância de considerar vários fatores ao escolher um veículo elétrico, garantindo que ele atenda de forma ideal aos requisitos de mobilidade e estilo de vida

de cada usuário.

#### 4.1.2.2 Parâmetros de Eficiência Energética e Emissões

Com a análise detalhada dos parâmetros de desempenho dos veículos elétricos concluída, é fundamental direcionar o foco para outro conjunto de fatores críticos que desempenham um importante papel na avaliação da viabilidade ambiental e econômica desses veículos. Além das características de desempenho, a avaliação do consumo de combustível, consumo de energia e emissões é indispensável.

Esses indicadores desempenham um papel essencial na análise abrangente dos veículos elétricos, influenciando diretamente sua eficiência e impacto ambiental. Os dados relevantes para esses indicadores estão apresentados na tabela a seguir, permitindo uma análise aprofundada do consumo de combustível, consumo de energia e emissões associados a cada modelo, fornecendo informações adicionais sobre a sustentabilidade e eficácia desses veículos.

Tabela 8 – Parâmetros de consumo e emissões dos principais carros elétricos do mercado.

Carro	Tipo de EV	Consumo de Combustível (km/l)	Consumo de Energia (W.h/km)	Emissões
Highlander	HEV	15,3	N/A	Padrão SULEV
RAV4	HEV	15,8	N/A	Padrão SULEV
ID.4/X/Cross	BEV	N/A	154,0	N/A
Aion Y	BEV	N/A	138,0	N/A
Aion S/S-Plus	BEV	N/A	115,3	N/A
HongGuang Mini	BEV	N/A	81,8	N/A
Qin Plus DM-i	PHEV	25,9	151,3	Padrão VI
Dolphin	BEV	N/A	110,0	N/A
Yuan Plus/Atto-3	BEV	N/A	144,0	N/A
Song Pro/Plus	PHEV	16,9	131,0	Padrão VI
Model 3	BEV	N/A	116,0	N/A
Model Y	BEV	N/A	142,0	N/A

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

Alguns dos valores apresentados na Tabela 8 refletem condições de teste específicas ou situações de operação distintas. No caso do RAV4 e do Song Pro/Plus, os números de consumo de combustível foram calculados com base na média entre valores de cidade e estrada fornecidos pelo INMETRO (2023), proporcionando uma visão mais abrangente do desempenho desses carros. Já para o ID.4 e o Model Y, os valores foram obtidos a partir de medições realizadas em condições climáticas moderadas.

No entanto, para o Aion S, HongGuang Mini, Qin Plus DM-i e Yuan Plus/Atto-3, os parâmetros de consumo foram estimados considerando a capacidade da bateria e o alcance do veículo, refletindo a eficiência do sistema elétrico. É possível verificar

a validade dessa abordagem, ao aplicar o mesmo raciocínio ao BYD Dolphin, obtendo um consumo estimado de cerca de 105 Wh/km, um resultado consistente com o valor da tabela. Também é importante notar que o consumo de energia estimado em Wh/km do Qin Plus DM-i corresponde exclusivamente à operação da bateria, excluindo o uso de combustíveis fósseis.

Os parâmetros de consumo e emissões dos EVs revelam informações valiosas sobre a eficiência e impacto ambiental desses automóveis. Inicialmente, é importante destacar uma diferença notável entre os HEVs e os PHEVs. Os PHEVs apresentam um melhor consumo de combustível, indicando que são menos dependentes de seus ICEs do que os HEVs. Isso se traduz em uma maior quilometragem por litro, tornando-os uma escolha mais eficiente em termos de consumo de combustível. No entanto, os PHEVs consomem mais energia elétrica por quilômetro do que os BEVs, devido à combinação de suas operações elétricas e ICEs.

Outro fator relevante a considerar é o consumo de energia dos EVs, medido em watts-hora por quilômetro (Wh/km). Aqui, observa-se que os veículos mais pesados, como o ID.4 e o Model Y, tendem a consumir mais energia elétrica por quilômetro, uma vez que suas baterias maiores estão relacionadas ao desempenho e alcance estendido. Em contrapartida, o HongGuang Mini, um veículo leve com foco urbano, consome menos energia, refletindo a eficiência de veículos menores.

Um aspecto importante observado é o trade-off entre o consumo de energia e o desempenho dos EVs. Modelos como o ID.4, Qin Plus DM-i e Model Y, que oferecem um desempenho superior em termos de potência e torque, consomem mais energia elétrica. Essa relação está diretamente relacionada ao tamanho da bateria, ao peso do veículo e à potência dos motores elétricos. Quanto mais poderosos os motores, maior o consumo de energia, embora também ofereçam um desempenho superior."

Por fim, é importante ressaltar que os veículos híbridos são os únicos nesta análise que emitem gases de efeito estufa diretamente. Por isso, precisam cumprir rigorosos padrões de emissão estabelecidos. Os HEVs da Toyota, Highlander e RAV4, atendem ao padrão SULEV (Super Ultra Low Emission Vehicle), um dos mais rígidos em termos de emissões. O SULEV representa uma das regulações mais rígidas para veículos com motores a combustão, sendo introduzido a partir do ano-modelo 2003. Essa norma impõe limites estritos para a emissão de diversos poluentes, incluindo hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) (BAUMGARTEN *et al.*, 2001).

Já os PHEVs, representados por Qin Plus DM-i e Song Pro/Plus, cumprem o padrão China VI, que combina regulamentações europeias e americanas. Este padrão também estabelece limites mais rigorosos para emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), material particulado (PM) entre outros poluentes (UPDATE, 2018). Essas regulamentações alegam promover um transporte mais limpo e sustentável, estabelecendo limites máximos para a emissão de poluentes, alinhando-se a padrões globais.



Em resumo, ao analisar os parâmetros de consumo e emissões dos veículos, fica evidente a influência de diversos fatores, como tamanho, necessidade de desempenho e configuração do motor, sobre esses valores. Os veículos híbridos se destacam por serem os únicos a emitir diretamente gases poluentes, embora seja importante notar que, dependendo da matriz de geração de energia elétrica, as emissões também podem ocorrer de forma indireta no funcionamento dos veículos puramente elétricos. No entanto, é notável que, mesmo quando os veículos híbridos emitem gases poluentes, os fabricantes estão comprometidos em seguir rigorosas normas de emissões, como os padrões SULEV e China VI.

#### 4.1.2.3 Parâmetros de Alcance

Após examinar os parâmetros de consumo de energia e desempenho dos veículos elétricos, é importante considerar o impacto desses fatores na autonomia desses EVs. A Tabela 9 apresenta os valores de autonomia dos carros analisados, permitindo a investigação de como esses veículos se comportam em termos de alcance, levando em consideração todos os aspectos previamente discutidos.

Tabela 9 – Parâmetros de autonomia dos principais carros elétricos do mercado.

Carro	Tipo de EV	Autonomia (km)
Highlander	HEV	984,9 WLTP
RAV4	HEV	886
ID.4/X/Cross	BEV	550 WLTP
Aion Y	BEV	600 NEDC
Aion S\S-Plus	BEV	510 NEDC
HongGuang Mini	BEV	170
Qin Plus DM-i	PHEV	1245 NEDC
Dolphin	BEV	427 WLTP
Yuan Plus/Atto-3	BEV	420 WLTP
Song Pro/Plus	PHEV	1090
Model 3	BEV	491 WLTP
Model Y	BEV	505 WLTP

Fonte: Tabela elaborada pelo autor.

Ao explorar os parâmetros de alcance de EVs, observa-se um cenário repleto de influências que moldam consideravelmente a autonomia de cada modelo. Diferentes características, como a presença de ICEs, capacidade da bateria, peso do veículo, consumo de energia elétrica, consumo de combustível e tamanho do tanque (para

híbridos), emergem como atores principais na determinação do alcance de um EV. É importante notar que o estilo de condução também desempenha um papel de grande relevância nesse contexto. A partir destes fatores, serão analisadas as características que afetam a distância que esses veículos podem percorrer com uma única carga ou abastecimento.

O impacto dos ciclos de direção na autonomia do veículo pode ser medido através de diferentes métodos de medição, notadamente o Novo Ciclo de Condução Europeu (NEDC) e o Procedimento Mundial de Teste de Veículos Leves (WLTP). A introdução do WLTP representa um avanço significativo, sendo alinhado aos padrões contemporâneos de condução, conforme ressaltado por Pavlovic *et al.* (2016). Este método busca oferecer estimativas de economia de combustível mais precisas, aproximando-se das condições reais de uso dos veículos, em contraste com o NEDC, que se mostrou menos representativo. Os autores, ao compararem os resultados dos testes, observam que o WLTP tende a ser mais pessimista, quanto ao consumo de combustível e energia. Isso resulta em valores menores de autonomia (embora mais realistas) do WLTP em comparação com o NEDC.

No caso do Wuling HongGuang Mini, o alcance é fornecido pelo fabricante sem informações detalhadas sobre o padrão de teste específico seguido. Contudo, considerando seu potencial foco em ambientes urbanos, o alcance apresentado pelo fabricante assume uma relevância significativa. Esse veículo, ao ser direcionado para um propósito mais específico, reflete uma abordagem especializada em atender às demandas de deslocamento urbano, tornando o valor de alcance congruente com suas características e finalidade presumida.

Entre os veículos analisados, os PHEVs da BYD se destacam com as maiores autonomies, o que pode ser atribuído à combinação de motores elétricos e motores a combustão, permitindo uma maior flexibilidade. No entanto, é importante notar que esses valores foram fornecidos pelos próprios fabricantes e podem não refletir totalmente o desempenho real. Mesmo assim, indicam que a combinação de tecnologias PHEV é vantajosa para alcançar maiores autonomies.

Em seguida, vêm os híbridos, HEVs, que também oferecem boas autonomies, mas com uma dependência significativa de combustíveis fósseis, o que gera impactos financeiros e ambientais. O alcance do Toyota RAV4 foi estimado com base no consumo de combustível e no tamanho do tanque de combustível, uma abordagem que fornece uma estimativa aproximada do alcance desse tipo de veículo. Ao realizar cálculos semelhantes para o modelo Highlander, chega-se a uma estimativa de cerca de 1037 quilômetros, uma proximidade notável em relação ao valor fornecido pelo WLTP. Isto demonstra a utilidade da estimativa, proporcionando uma visão coerente da autonomia do EV, ainda que derivada de parâmetros indiretos.

Os BEVs dependem inteiramente da capacidade da bateria e da eficiência

energética para determinar seu alcance. É notável que a autonomia dos BEVs seja diretamente afetada pelo peso vazio do veículo e pela capacidade da bateria. O Volkswagen ID.4, por exemplo, possui uma autonomia semelhante à dos veículos da GAC, mas devido ao seu maior peso, requer uma bateria de maior capacidade. Além disso, é possível observar uma relação inversa entre o desempenho e a autonomia nos veículos totalmente elétricos. Os modelos da Tesla, embora ofereçam maior desempenho em termos de aceleração e velocidade máxima em comparação com outros BEVs, apresentam autônias semelhantes, exceto pelo HongGuang Mini, um veículo de baixo custo com uma autonomia limitada.

Em conclusão, a análise dos parâmetros de alcance dos EVs demonstra a importância de considerar esses fatores em conjunto. Veículos projetados para uso exclusivamente urbano, com percursos diários curtos, como o HongGuang Mini, se beneficiam de baterias menores e motores menos potentes, resultando em um alcance menor, mas a um preço muito mais acessível. Por outro lado, carros com finalidades mais gerais podem ser híbridos puros, oferecendo maior autonomia, mas com desempenho menos potente e maior dependência de combustíveis fósseis. Os veículos totalmente elétricos, embora mais caros, oferecem desempenho superior devido a potências e torques maiores, mas têm alcances menores. Além disso, os híbridos plug-in combinam autônias semelhantes às dos híbridos com o desempenho dos BEVs, mas são mais caros e também dependem de combustíveis fósseis. A escolha de um EV deve levar em consideração não apenas o desempenho, mas também a adequação aos requisitos de mobilidade e ao estilo de vida do usuário.

## 5 CONCLUSÃO

Este levantamento detalhado dos componentes de powertrain dos principais veículos elétricos do mercado global reforça sua relevância estratégica no contexto atual da busca por redução de emissões de gases poluentes. A crescente adoção de veículos elétricos pelas montadoras representa um passo significativo na direção das metas governamentais para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, destacando a importância de compreender as soluções de powertrain adotadas pelos principais fabricantes.

Nesta análise foram identificadas relações importantes entre os tipos de Carros Elétricos, seus Componentes de Powertrain e seus parâmetros de performance. Foi demonstrada a necessidade de uma análise de todos os parâmetros de performance em conjunto pois foram identificados trade-offs como o de desempenho e autonomia, por exemplo. Isto destaca a importância da missão do veículo em seu projeto, além da importância da escolha dos componentes de powertrain no desenvolvimento de carros melhores.

Os resultados obtidos fornecem insights valiosos para a indústria automotiva e os consumidores. A prevalência dos Motores Síncronos de Ímãs Permanentes e das baterias de íon de lítio destaca tendências claras na escolha de componentes para alcançar eficiência e desempenho. Além disso, a análise das transmissões diretas para veículos totalmente elétricos e do uso predominante da tecnologia ECVT em híbridos contribui para a compreensão das opções de powertrain mais eficazes para diferentes tipos de veículos.

Para futuras pesquisas, sugerem-se duas abordagens distintas: a análise de veículos em um contexto mais regional, como o mercado brasileiro, para compreender as estratégias específicas adotadas por diferentes regiões e setores; e a investigação de veículos para aplicações agrícolas, visando a aprofundar o entendimento das soluções de powertrain neste importante setor.

Além disso, explorar as arquiteturas de powertrain, em vez de focar exclusivamente nos componentes, pode revelar padrões adicionais e nuances no design dos sistemas de propulsão. A análise de veículos de transporte de carga também representa uma área promissora para investigações futuras, considerando o impacto significativo desse setor nas emissões totais de gases poluentes. Essas sugestões visam enriquecer ainda mais o entendimento sobre a evolução dos powertrains elétricos e suas implicações nos diversos segmentos da mobilidade.

## REFERÊNCIAS

ARENAEV. **BYD Dolphin 2023**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: [https://www.arenaev.com/byd\\_dolphin\\_2023-190.php#60](https://www.arenaev.com/byd_dolphin_2023-190.php#60).

Audi Club North America. **Volkswagen Group opens MEB electric platform used on Q4 to third parties**. 2019. Acesso em: 23 set. 2023. Disponível em: [https://audiclubna.org/etron/2019/03/05/volkswagen-group-opens-meb-electric-platform-used-on-q4-to-third-parties/db2019a100383\\_large/](https://audiclubna.org/etron/2019/03/05/volkswagen-group-opens-meb-electric-platform-used-on-q4-to-third-parties/db2019a100383_large/).

AUTO-DATA.NET. **BYD Song Plus EV 71.7 kWh (184hp)**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.auto-data.net/en/byd-song-plus-ev-71.7-kwh-184hp-46920>.

AUTOCAR. **GAC Aion S prices and specifications announced**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.autocar.co.uk/car-news/new-cars/gac-aion-s-prices-and-specifications-announced>.

AUTOCATALOGARCHIVE. **BYD Qin 2021**. 2021. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://autocatalogarchive.com/wp-content/uploads/2021/07/BYD-Qin-2021-PH.pdf>.

AUTOELECTRO. **BYD Dolphin Electric Car**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://autoelectro.cn/byd-dolphin-electric-car.html>.

AUTOELECTRO. **BYD Dolphin: o carro elétrico mais eficiente do mercado brasileiro**. 2023. Acesso em: 12/11/2023. Disponível em: <https://autoelectro.cn/byd-dolphin-electric-car.html>.

BANSAL, R. C. Electric vehicles. **Electrical and Computer Engineering**, v. 125, p. 55, 2005.

BAUMGARTEN, H.; HABERMANN, K.; WEINOWSKI, R. **Low emission concept for SULEV**. [S.l.], 2001.

BYD Auto Brasil. **Manuais Dolphin**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.bydcars.com.br/manuais-dolphin>.

BYD Auto Brasil. **Manuais Song Plus DM-i**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.bydcars.com.br/manuais-song-plus-dmi>.

BYD Auto Brasil. **Yuan Plus EV**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.bydcars.com.br/yuan>.

BYD Brasil. **BYD Dolphin EV: o carro elétrico mais eficiente do mercado brasileiro**. 2023. Disponível em: <https://www.byd.com.br/byd-dolphin-ev-o-carro-eletrico-mais-eficiente-do-mercado-brasileiro/>.

Car and Driver. **Tesla Model 3 Specs**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.caranddriver.com/tesla/model-3/specs/>.

Car and Driver. **Tesla Model Y Specs**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.caranddriver.com/tesla/model-y/specs>.

Car and Driver. **Toyota Highlander Review, Pricing, and Specs**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.caranddriver.com/toyota/highlander>.

CARBUZZ. **2023 Volkswagen ID.4 Pro S Full Specs, Features and Price**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://carbuzz.com/cars/volkswagen/id-4/2023-volkswagen-id-4-pro-s>.

Casa do Motor Elétrico. 2023. <https://www.casadomotoreletrico.com.br/>. Acesso em: 23 set. 2023.

CHAN, C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 90, n. 2, p. 247–275, 2002.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. [S.l.]: AMGH editora, 2013.

CHINAMOBIL.RU. **BYD Qin Plus DM Specifications and Photos**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.chinamobil.ru/eng/byd/qin-plus-dm/?view=props>.

CHINAMOBIL.RU. **BYD Song Plus DM-i Specifications and Photos**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.chinamobil.ru/eng/byd/song-plus-dmi/?view=props>.

CHINAMOBIL.RU. **BYD Yuan Plus Specifications and Photos**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.chinamobil.ru/eng/byd/yuan-plus/?view=props>.

CHINAMOBIL.RU. **GAC Aion S Specifications and Photos**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.chinamobil.ru/eng/gac/aion-s/?view=props>.

CHINAMOBIL.RU. **GAC Aion Y Specifications and Photos**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.chinamobil.ru/eng/gac/aion-y/?view=props>.

CHINAMOBIL.RU. **Wuling Mini EV Specifications and Photos**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.chinamobil.ru/eng/wuling/mini-ev/?view=props>.

CHINAPEV. **2020 GAC Aion S EV Technical Specs**. 2023. Acesso em: 18 out. 2023. Disponível em: <https://www.chinapev.com/specs/2020-gac-aion-s-ev-technical-specs/#:~:text=2020%20GAC%20Aion%20S%20is%20a%20pure%20electric,with%20max.%20135kW%20and%20300N.m.%20Price%20range%3A%20139800-205800yuan>.

CHINAPEV. **GAC Toyota iA5 is Totally a Sibling of GAC Aion S**. 2023. Acesso em: 18 out. 2023. Disponível em: <https://www.chinapev.com/gac-motor/gac-toyota/gac-toyota-ia5-is-totally-a-sibling-of-gac-aion-s/#:~:text=The%20power%20part%20uses%20a%20permanent%20magnet%20synchronous,this%20is%20also%20the%20same%20as%20Aion%20S>.

CMS-COMERCIALES. **BYD Qin Plus DM i**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: [https://cms-comerciales.nebula.net.co/uploads/QIN\\_PLUS\\_DM\\_i\\_4d03179fbf.pdf](https://cms-comerciales.nebula.net.co/uploads/QIN_PLUS_DM_i_4d03179fbf.pdf).

D70W7. **Toyota Prius cutaway**. 2016. [Fotografia]. Acesso em: 10, nov. 2023. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/d70w7/30468369295/>.

DENTON, T. **Electric and hybrid vehicles**. [S.l.]: Routledge, 2020.

EDMUNDS. **Toyota Highlander Hybrid 2023 Features and Specs**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.edmunds.com/toyota/highlander-hybrid/2023/features-specs/>.

EHSANI, M.; GAO, Y.; LONGO, S.; EBRAHIMI, K. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**. [S.l.]: CRC press, 2018.

Energy Institute Statistical Review of World Energy . **SP Global Platts**. 2023. Acessado em: 10 ago. 2023.

EV Database. **BYD DOLPHIN 60.4 kWh (2023) Preise und technische Daten**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://ev-database.org/de/pkw/1919/BYD-DOLPHIN-604-kWh>.

EV Database. **Tesla Model Y**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://ev-database.org/car/1743/Tesla-Model-Y>.

EV Database. **Volkswagen ID.4 Pro (2023) price and specifications**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://ev-database.org/uk/car/2028/Volkswagen-ID4-Pro>.

EVSSpecifications.com. **2022 Volkswagen ID.4 Pro AWD - Specifications and price**. 2023. <https://www.evspecifications.com/en/model/24cd278>. Acessado em: 12 nov. 2023.

EVSSpecifications.com. **Tesla Model 3 Standard Range Plus RWD (2021)**. 2023. Disponível em: <https://www.evspecifications.com/en/model/5cc229c>.

EVSSpecifications.com. **Tesla Model Y Long Range AWD (2021)**. 2023. Disponível em: <https://www.evspecifications.com/en/model/2ac52a0>.

GAC Jordan. **AION Y Booklet-A**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://gacjordan.com/brochures/AION-Y-Booklet-LR.pdf>.

HUSAIN, I. **Electric and hybrid vehicles: design fundamentals**. [S.l.]: CRC press, 2003.

INMETRO. **Tabela de Eficiência Energética Veículos Automotores Leves: Tabela Ano 2023**. 2023. <https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/veiculos-automotivos-pbe-veicular>. Acesso em: 10 nov. 2023.

INSIDEEVS. **GAC Aion S Is Equipped With 58.8 kWh CATL NCM 811 Battery**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://insideevs.com/news/343627/gac-aion-s-is-equipped-with-588-kwh-catl-ncm-811-battery/>.

KANE, M. **Review: Wuling Hong Guang Mini EV**. InsideEVs, 2020. Disponível em: <https://insideevs.com/news/450654/review-wuling-hong-guang-mini-ev/>.

KING, C. **Top 10 best selling electric cars in 2023 H1**. 2023. <https://evmagazine.com/top10/top-10-best-selling-electric-cars-in-2023-h1>. Acesso em: 18 out. 2023.

Knauf Industries. **Knauf Automotive - Lightweight solutions for the automotive industry**. 2021. Disponível em: <https://knaufautomotive.com/>.

LAMBERT, F. **Faraday Future's first patent is for a new inverter with unprecedented power density**. 2016. <https://electrek.co/2016/03/01/faraday-future-patent-inverter/>. Acesso em: 4 out. 2023.

LARMINIE, J.; LOWRY, J. **Electric vehicle technology explained**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.

LEE, R. **BYD Song Pro comes as a DM-i hybrid with a 1090km range**. CarNewsChina, 2021. Disponível em: <https://carnewschina.com/2021/12/13/byd-new-member-come-in-super-hybrid-system/>.

LICARCO. **BYD Song Plus EV Specs, Price, Range and more**. 2023. <https://www.licarco.com/byd-song-plus-ev>. Acesso em: 12/11/2023.

LIRA, C. Carro híbrido mais econômico do brasil, byd song plus tem consumo de moto. **Autoesporte**, fev 2023. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/eletricos-e-hibridos/noticia/2023/02/carro-hibrido-mais-economico-do-brasil-byd-song-plus-tem-consumo-de-moto.ghtml>.

MA, L. Byd lança versão atualizada do qin plus dm-i 2023 phev sedan. **EVMagz**, February 2023. Acessado em 12 de novembro de 2023. Disponível em: <https://evmagz.com/byd-launches-updated-qin-plus-dm-i-2023-phaev-sedan/>.

MARSH, S. **Meet the little engine that did**. 2015. <https://www.todayonline.com/lifestyle/cars/meet-little-engine-did>. Acesso em: 08 out. 2023.

MC Motor Technology Co. Ltd. **Motor de Relutância Síncrona de Design Confiável e Maduro**. 2023. [https://pt.made-in-china.com/co\\_mc-motor/product\\_Reliable-and-Mature-Design-Synchronous-Reluctance-AC-Motor\\_rgorsryyg.html](https://pt.made-in-china.com/co_mc-motor/product_Reliable-and-Mature-Design-Synchronous-Reluctance-AC-Motor_rgorsryyg.html). Acesso em: 30 de setembro de 2023.

MECHTEX. **AC Synchronous Geared Motors 230V 50Hz 5rpm 0.5Nm**. 2023. <https://shop.mechtex.com/ac-synchronous-geared-motors-230v-50hz-5rpm-05nm>. Acesso em: 24 set. 2023.

Microinstruments Co. **BLDC E-VEHICLE MOTOR**. 2023. <https://www.microinstrumentsco.com/products/motors/dc-motors/bldc-motors/bldc-e-vehicle-motor>. Acesso em: 24 set. 2023.

MIHALASCU, D. **Watch: GAC Aion V Charges From 30% To 80% In Just 10 Minutes**. InsideEVs, 2022. Disponível em: <https://insideevs.com/news/610833/watch-gac-aion-v-charge-from-30-80-percent-10-minutes/>.

MILLER, J. M. **Propulsion systems for hybrid vehicles**. [S.l.]: Iet, 2004. v. 45.

MOTOREU. **BYD Song Plus DM-i 1.5 (110 hp) 2020-2023 MPG, WLTP, Fuel consumption**. 2023. Acessado em: 12/11/2023. Disponível em: <https://motoreu.com/byd-song-dm-i-1.5-data-204912>.



MOTORWATT. **GAC Aion Y Electric SUV Specs**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://ev.motorwatt.com/ev-database/database-electric-cars/gac-motor-aion-y>.

Our World in Data. **Why did renewables become so cheap so fast?** 2023. Acessado em: 10 ago. 2023. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/fossil-fuel-price-index>.

OUZ. **New 2023 BYD Dolphin Launched in China, Price Starts at 16,700 USD**. 2022. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.gizmochina.com/2022/12/29/new-2023-byd-dolphin-launched-in-china-price-starts-at-16700-usd/>.

PAVLOVIC, J.; MAROTTA, A.; CIUFFO, B. Co2 emissions and energy demands of vehicles tested under the nedc and the new wltc type approval test procedures. **Applied Energy**, Elsevier, v. 177, p. 661–670, 2016.

PRO-LIFT-MONTAGETECHNIK. **Imagem do produto 00404**. 2023. [https://www.pro-lift-montageteknik.com/epages/78156040.sf/en\\_GB/?ViewObjectPath=%2FShops%2F78156040%2FProducts%2F00404](https://www.pro-lift-montageteknik.com/epages/78156040.sf/en_GB/?ViewObjectPath=%2FShops%2F78156040%2FProducts%2F00404). Acesso em: 24 set. 2023.

RANDALL, C. Cabrio version of the hong guang mini ev incoming. **Electrive.com**, sep 2022. Disponível em: <https://www.electrive.com/2022/09/27/cabrio-version-of-the-hong-guang-mini-ev-incoming/>.

SAKAI, Y. **The “Ecvt” electro continuously variable transmission**. [S.l.], 1988.

SINGH, B.; JAIN, P.; MITTAL, A.; GUPTA, J. Direct torque control: a practical approach to electric vehicle. *In*: IEEE. **2006 IEEE Power India Conference**. [S.l.], 2006. p. 4–pp.

TANG, Y. **GAC Aion S Plus goes on sale, starts at about \$21,600 after subsidies**. CNEVPost, 2021. Disponível em: <https://cnevpost.com/2021/06/24/gac-aion-s-plus-goes-on-sale-starts-at-about-21600-after-subsidies/>.

TEAGUE, J. **RAV4 Hybrid Was Toyota’s Best-Selling Hybrid in First Half 2023. You May Not Believe Second Place**. 2023. <https://www.torquenews.com/6626/rav4-hybrid-was-toyotas-best-selling-hybrid-first-half-2023-you-may-not-believe-second-place>. Acesso em: 18 out. 2023.

TESLA. **Model 3 Emergency Response Guide**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: [https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/Model\\_3\\_Emergency\\_Response\\_Guide\\_pt.pdf](https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/Model_3_Emergency_Response_Guide_pt.pdf).

TESLA. **Model 3 Owner’s Manual**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: [https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en\\_us/](https://www.tesla.com/ownersmanual/model3/en_us/).

TESLA. **Model Y Owner’s Manual**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: [https://www.tesla.com/ownersmanual/modely/en\\_us/](https://www.tesla.com/ownersmanual/modely/en_us/).

TESLA. **Tesla Roadster**. 2023. Disponível em: <https://www.tesla.com/roadster>.

The Economist. Big carmakers are placing vast bets on electric vehicles. **The Economist**, v. 431, n. 9143, p. 57–58, 2019. Disponível em: <https://www.economist.com/business/2019/04/17/big-carmakers-are-placing-vast-bets-on-electric-vehicles>.

TOYOTA. **Highlander eBrochure**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: [https://www.toyota.com/content/dam/toyota/brochures/pdf/2023/highlander\\_ebrochure.pdf](https://www.toyota.com/content/dam/toyota/brochures/pdf/2023/highlander_ebrochure.pdf).

TOYOTA. **Highlander Features MPG Other Price**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: [https://www.toyota.com/highlander/features/mpg\\_other\\_price/6964/6965/6966](https://www.toyota.com/highlander/features/mpg_other_price/6964/6965/6966).

TOYOTA. **Highlander Hybrid**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.toyota.com/highlanderhybrid/>.

TOYOTA. **Highlander Hybrid: Hybrid Vehicle Dismantling Manual**. 2023. Acessado em: 12 nov. 2023. Disponível em: <https://techinfo.toyota.com/techInfoPortal/staticcontent/en/techinfo/html/prelogin/docs/hlanderhvdisman3rd.pdf>.

TOYOTA. **RAV4**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.toyota.com.br/modelos/rav4>.

TOYOTA. **RAV4 Full Specs**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: [https://www.toyota.com/rav4/features/mechanical\\_performance/4437/4448/4530](https://www.toyota.com/rav4/features/mechanical_performance/4437/4448/4530).

TOYOTA. **RAV4 Hybrid Features**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.toyota.com/rav4hybrid/rav4hybrid-features/performance/>.

TOYOTA-CLUB.NET. **FAQ: E-Four 4WD System**. 2022. [https://www.toyota-club.net/files/faq/19-10-10\\_faq\\_e-four\\_4wd\\_eng.htm](https://www.toyota-club.net/files/faq/19-10-10_faq_e-four_4wd_eng.htm). Acessado em: 12 nov. 2023.

Toyota Comunica. **Toyota Comunica - Toyota Comunica**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://media.toyota.com.ar/f75aa401-9df0-4d48-9a9a-2122ef6e4504.pdf>.

Toyota Portugal. **RAV4 Plug-in - Modelos e Especificações**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.toyota.pt/carros/rav4-plugin/features-and-specs>.

TU Delft OCW. **1.5.2 Lecture Notes: Power Electronics in Electric Cars**. 2023. Disponível em: <https://ocw.tudelft.nl/courses/electric-cars-technology/?view=readings&paging=1>.

TU Delft OCW. **2.2.2 Lecture Notes: Types of EV**. 2023. Disponível em: <https://ocw.tudelft.nl/course-readings/2-2-2-lecture-notes-types-of-ev/>.

Ultimate Specs. **BYD Atto 3 EV specs, range, dimensions**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.ultimatespecs.com/car-specs/BYD/133872/BYD-Atto-3-EV.html>.

Ultimate Specs. **Tesla Model 3 Standard specs, range, dimensions**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Tesla/129812/Tesla-Model-3-Standard.html>.

Ultimate Specs. **Tesla Model Y Long Range AWD specs, range, dimensions**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Tesla/118935/Tesla-Model-Y-Long-Range-AWD.html>.

Ultimate Specs. **Toyota Highlander 2.5 Hybrid AWD specs, range, dimensions**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Toyota/122665/Toyota-Highlander-25-Hybrid-AWD.html>.

Ultimate Specs. **Toyota RAV4 (XA50) 2.5 Plug-in Hybrid AWD specs, range, dimensions**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: [https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Toyota/125626/Toyota-RAV4-\(XA50\)-25-Plug-in-Hybrid-AWD.html](https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Toyota/125626/Toyota-RAV4-(XA50)-25-Plug-in-Hybrid-AWD.html).

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7**. [S.l.]: AMGH Editora, 2014.

UPDATE, P. China's stage vi emission standard for heavy-duty vehicles (final rule). **POLICY**, 2018.

VERMA, S. *et al.* A comprehensive review on energy storage in hybrid electric vehicle. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, Elsevier, v. 8, n. 5, p. 621–637, 2021.

Volkswagen Media Services. **Volkswagen ID4 RWD Tech Specs Final.pdf**. 2021. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://media.vw.com/assets/documents/original/13337-2021ID4RWDTechSpecsFinal.pdf>.

WinAck Battery Co., Ltd. **Wuling Hongguang MINI EV Battery Pack - News**. 2023. Acesso em: 28 out. 2023. Disponível em: <https://www.winackbattery.com/news/Wuling-Hongguang-MINI-EV-Battery-Pack.html>.