

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO
TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

VALDYR ZANCANELA FILHO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS DE CARRO
ELÉTRICO EXISTENTES**

**VITÓRIA
2021**

VALDYR ZANCANELA FILHO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS DE CARRO
ELÉTRICO EXISTENTES**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Valdyr Zancanela Filho**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. D.Sc. Oureste Elias Batista

VITÓRIA
2021

VALDYR ZANCANELA FILHO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TECNOLOGIAS DE CARRO
ELÉTRICO EXISTENTES**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Valdyr Zancanela Filho, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em ___ de _____ de 2021

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. D.Sc. Oureste Elias Batista
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora

Eng.^a Aline Gonçalves Santos
Examinadora

RESUMO

Carros já são usados em todo mundo há mais de um século e se tornaram fundamentais para o estilo de vida do ser humano moderno, ultrapassando a marca de uma unidade para cada 7 habitantes. Ao longo da sua história, sofreram diversas mudanças, sempre acompanhando e impulsionando a criação de novas tecnologias. O mundo atual não é mais o mesmo de um século atrás. Com os avanços de certas tecnologias, alguns novos problemas surgiram, como o aumento das emissões de dióxido de carbono (CO₂), que tem influência direta no efeito estufa. O setor de transporte, por ser majoritariamente movido por combustíveis fósseis, desempenha um grande papel nesse aumento. Países em todo o mundo, para tentar controlar esse crescimento, começaram a implementar medidas que visam reduzir suas emissões, dentre elas o incentivo a tecnologias sustentáveis, como a do carro elétrico. O carro elétrico além de ser uma tecnologia livre de emissões diretas, é muito mais eficiente na conversão de energia do que os que usam motor a combustão. O trabalho apresenta uma visão geral de como se encontra o desenvolvimento das tecnologias que constituem um carro elétrico e um estudo comparativo entre todos os modelos comercializados nos Estados Unidos da América entre 2011 e início de 2021. A partir dos resultados alcançados, torna-se possível realizar uma análise rápida entre as diferentes tecnologias existentes de carros elétricos, que tem avançado cada vez mais rápido nos últimos anos.

Palavras-chave: Carro elétrico. Tecnologia sustentável. Máquinas elétricas. Baterias. Inversor de frequência. Controle vetorial.

ABSTRACT

Cars have been used all over the world for more than a century, becoming fundamental to the lifestyle of the modern human being, surpassing the mark of one unit for every 7 inhabitants. Throughout its history, have undergone several changes, always following and driving the creation of new technologies. The current world is not the same as it used to be a century ago, within the advances of some technologies, new problems have emerged, such as the increase in carbon dioxide (CO₂) emissions, which has a direct influence on the greenhouse effect. The transportation sector, being mostly driven by fossil fuels, plays a major role in this increase. Some countries all around the globe, trying to control this increase, have started to implement policies that aim to reduce their emissions, encouraging the use of sustainable technologies, such as the electric car. The electric car, besides being a clean technology, is way more efficient in converting energy than those using a combustion engine. The proposed work presents an overview about the development of technologies that are present in an electric car and a comparative study between all the models sold in the United States of America. Using the results produced, it is possible to carry out a quick analysis between the different existing electric car technologies, which has been advancing even faster in the recent years.

Keywords: Electric car. Sustainable technology. Electric machines. Batteries. Frequency inverter. Field oriented control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Primeiro carro	12
Figura 2 – Carro elétrico mais vendido no ano de 2019	14
Figura 3 – Visão geral dos sistemas no carro elétrico	19
Figura 4 – Carro Elétrico	20
Figura 5 – Representação gráfica das linhas de indução magnéticas em um condutor	24
Figura 6 – Classificação das máquinas elétricas rotativas	25
Figura 7 – Par de escovas (<i>Brushes</i>) e comutador (<i>Commutator</i>)	26
Figura 8 – Anéis coletores (esquerda) e escovas (direita)	26
Figura 9 – Enrolamento trifásico	27
Figura 10 – Motor de indução com rotor em gaiola de esquilo.	28
Figura 11 – Interação entre campos no rotor gaiola de esquilo	29
Figura 12 – Formas de onda da FCEM (E) e da corrente de alimentação (I)	30
Figura 13 – Formas de onda da FCEM (E) e da corrente de alimentação (I)	30
Figura 14 – (a) MSIP Polos lisos; (b) MSIP polos salientes; Curva de torque x velocidade: (c) MSIP polos lisos, (d) MSIP polos salientes	31
Figura 15 – Inversor trifásico com três braços	32
Figura 16 – Sequência de chaveamento e saída resultante	33
Figura 17 – Exemplo de PWM de onda triangular	34
Figura 18 – Eixos d e q em relação aos polos do rotor	35
Figura 19 – Controle Vetorial com o uso de SVPWM	36
Figura 20 – Esquema MERSS: FCEM e sinais de comando do PWM.....	37
Figura 21 – Esquema MERSS. Fluxo de correntes no período 0-30° quando: (a) chaves ligadas, (b) chaves desligadas.....	37
Figura 22 – Configurações do trem de força. Longitudinal: (a) com embreagem e caixa de marcha e (b) com transmissão fixa. Transversal com tração em um eixo: (c) com diferencial e (d) com duas MEs. Transversal com tração em dois eixos: (e) com diferencial e (f) com diferencial em um eixo e duas MEs no outro	38
Figura 23 – Chassi do <i>Model S Plaid</i> 2021, de três MEs da Tesla	40
Figura 24 – Principais elementos de uma célula de bateria	42
Figura 25 – Formato de célula cilíndrica e prismática.....	45
Figura 26 – Sistema de resfriamento de células cilíndricas de bateria	46
Figura 27 – Sistema de gerenciamento da bateria	47
Figura 28 – Estação de carregamento na sede da EDP em Vitória - ES	49
Figura 29 – Mapa de pontos de carregamento no Brasil	49
Figura 30 – Conectores CA (carregamento lento)	50
Figura 31 – Conectores de CC (carregamento rápido)	51
Figura 32 – Conector de CA e CC proprietário da Tesla.....	51
Figura 33 – Teste da USEPA com perfil de condução na cidade	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dez carros elétricos mais potentes de modelos diferentes entre os veículos avaliados nesse estudo ..	57
Tabela 2 – Cinco modelos diferentes de carros elétrico mais eficientes no perfil de direção combinado avaliados no estudo entre 2011 e início de 2021	58
Tabela 3 – Cinco modelos diferentes de carros elétrico mais eficientes na cidade avaliados no estudo entre 2011 e início de 2021	58
Tabela 4 – Cinco modelos diferentes de carros elétrico mais eficientes na estrada avaliados no estudo entre 2011 e início de 2021	58
Tabela 5 – Cinco modelos diferentes de carros elétrico com maior autonomia em todos os perfis de direção no estudo entre 2011 e início de 2021	59
Tabela 6 – Cinco modelos diferentes de carros elétrico com maior capacidade total do banco de baterias no estudo entre 2011 e início de 2021	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo de tecnologias de baterias até o ano de 2010	43
Quadro 2 – Modos de carga de acordo com a IEC-62196-1:2014	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Número total de veículos (2006-2015).....	13
Gráfico 2 – Quantidade total de veículos elétricos no mundo (2010-2019).....	14
Gráfico 3 – Porcentagem de emissão de CO ₂ no mundo (setor de transportes)	15
Gráfico 4 – Porcentagem de emissão de CO ₂ no Brasil (setor de transportes).....	16
Gráfico 5 – Curva de torque e potência esperadas do sistema de tração elétrica.....	22
Gráfico 6 – Curvas de torque e potência (<i>power</i>) por velocidade (<i>rear motor speed</i>), para diferentes SOCs (o valor percentual acima de cada curva).....	23
Gráfico 7 – Valor por kWh em dólar das baterias de lítio-íon.....	44
Gráfico 8 – Distribuição dos conectores por tipo no Brasil.....	52
Gráfico 9 – Distribuição por tipo de ME em carros elétricos com uma ME	55
Gráfico 10 – Distribuição por tipo de ME em carros elétricos com duas MEs	56
Gráfico 11 – Distribuição a respeito do eixo de tração.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BDCM	<i>Brushed DC Machine</i>
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
BLDC	<i>Brushless DC</i>
BMS	<i>Battery Management System</i>
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
DC	<i>Direct Current</i>
EUA	Estados Unidos da América
EVSE	<i>Electric Vehicle Supply Equipment</i>
FCEM	Força contra eletromotriz
FOC	<i>Field Oriented Control</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IP	Ímã permanente
IPMSM	<i>Interior Permanent Magnet Synchronous Machine</i>
KERS	<i>Kinetic Energy Recovery System</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>
ME	Máquina elétrica
MERSS	<i>Maximum Energy Recovery Switching Scheme</i>
MET	Máquina elétrica trifásica
MI	Máquina de indução
MSIP	Máquina síncrona de ímãs permanentes
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Machine</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SOC	<i>State Of Charge</i>
SVPWM	<i>Space Vector Width Modulation</i>
US DOE	<i>United States Department of Energy</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contextualização	12
1.2	Justificativa	15
1.3	Objetivos	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
2	CARRO ELÉTRICO	18
2.1	Introdução	18
2.2	Visão Geral do Carro Elétrico	19
3	SISTEMA DE TRACÇÃO ELÉTRICA	21
3.1	Introdução	21
3.2	Máquinas Elétricas	23
3.2.1	Tipos de Máquinas Elétricas	25
3.2.2	Máquinas de Indução.....	27
3.2.3	Máquinas Síncronas de Ímãs Permanentes.....	29
3.3	Inversor de Frequência	32
3.3.1	Controle Vetorial	34
3.4	Configurações do Trem de Força	38
4	SISTEMA DE ENERGIA	41
4.1	Introdução	41
4.2	Baterias	41
4.2.1	Baterias de Lítio-íon	44
4.3	Bateria Auxiliar	47
4.4	Carregador	48
4.5.1	Estações de Carregamento Dedicadas	48
4.5.2	Conectores	50
4.5.3	Modos de Carga.....	52
5	METODOLOGIA	53
6	ESTUDO COMPARATIVO	55
6.1	Comparativo dos Sistemas de Tração Elétrica	55
6.2	Comparativo entre Sistemas de Energia	57
7	CONCLUSÃO	60

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
APÊNDICE A – BASE DE DADOS FILTRADOS	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Carros fazem parte da história da humanidade há mais de um século. Apesar de uma origem controversa, muitos creditam a criação do primeiro carro para uso prático a Karl Friedrich Benz (LIBRARY OF CONGRESS, 2019) no ano de 1886, na Alemanha, e que pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 – Primeiro carro

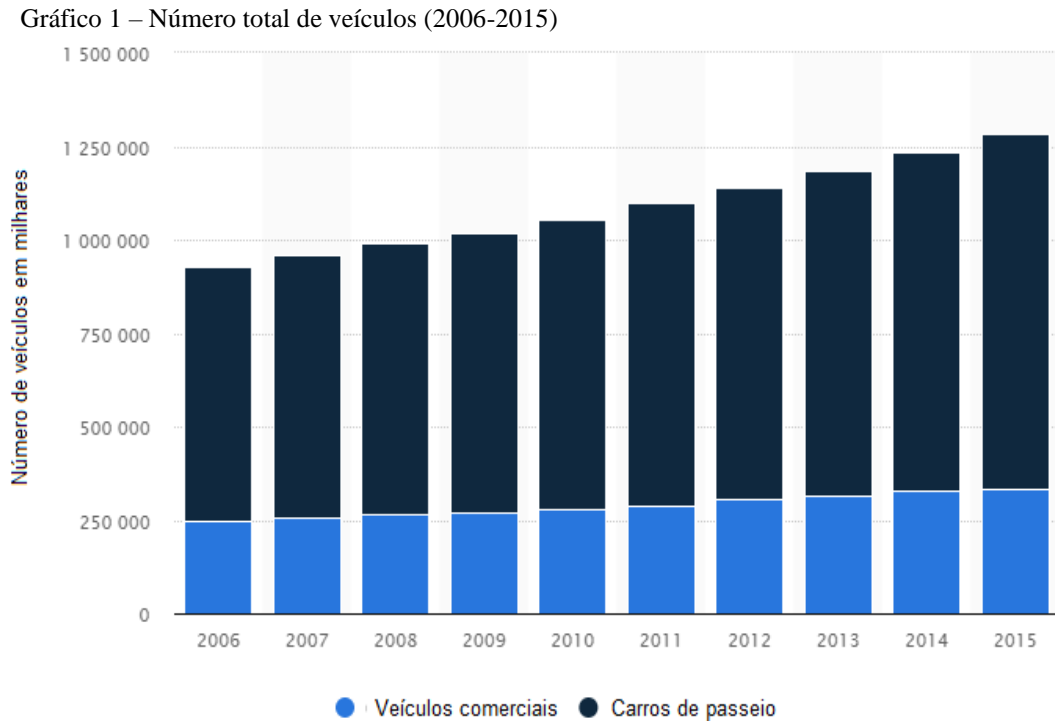


Fonte: *Library of Congress* (2019).

Após mais de 130 anos após sua invenção, os veículos foram bastante modificados e estão bem diferentes do primeiro modelo existente. As mudanças não foram apenas estéticas, mas também no combustível que os abastecem, podendo estes serem de variados tipos, sendo o veículo de Benz abastecido a gasolina e durante os anos seguintes surgindo modelos rodando com diesel, álcool, energia elétrica e até mesmo hidrogênio (MAZDA, 2004). O uso de duas fontes de energia ao mesmo tempo também é bastante comum atualmente, como pode ser observado nos veículos flex e híbridos.

No mundo moderno, a presença de veículos tornou-se extremamente comum e, pela primeira vez, no ano de 2010, alcançou-se a marca de 1 bilhão de veículos ao redor do globo, à época correspondendo a uma unidade para cada 7 habitantes, tornando-se assim inegável a sua importância em termos econômicos e de transporte. Em 2015 esse número ultrapassou o valor

de 1,28 bilhão, somados carros de passeio e veículos comerciais, sendo excluídos caminhões e veículos pesados (STATISTA, 2017). O Gráfico 1 apresenta o crescimento do número total de veículos no mundo entre 2006 e 2015.



Fonte: Statista (2017).

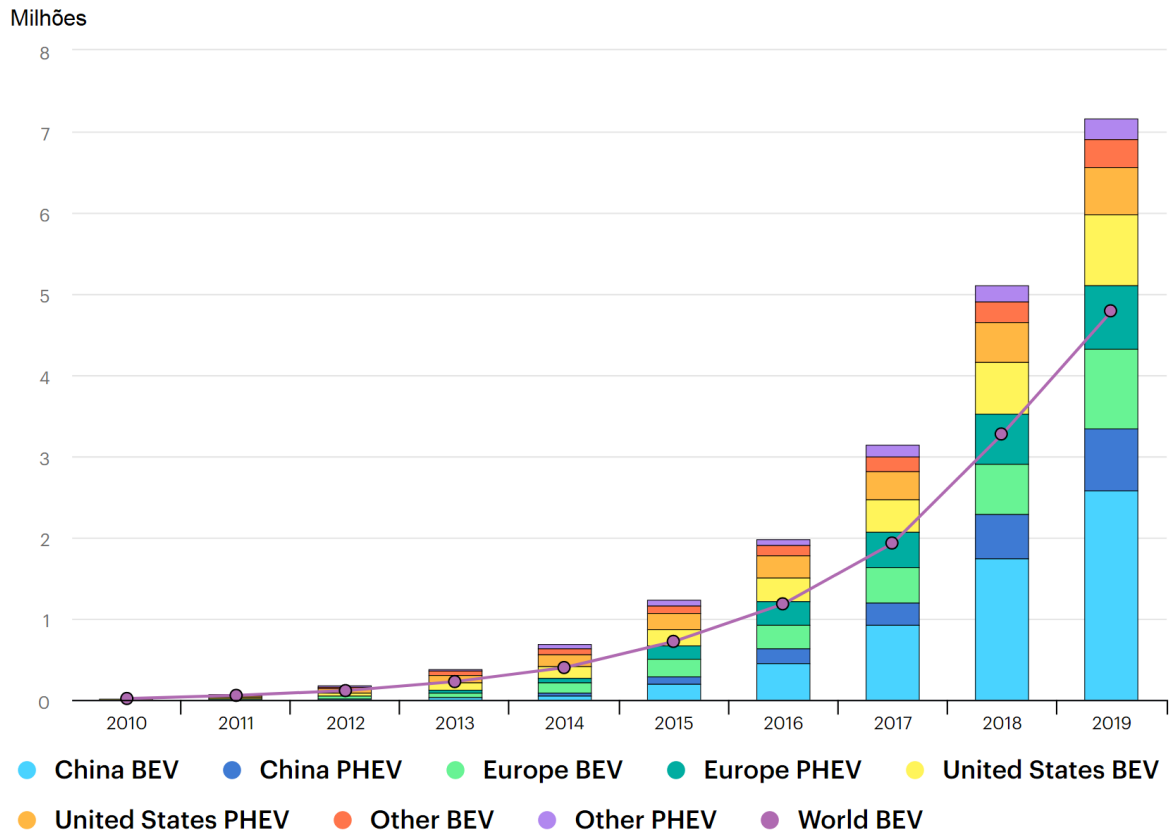
Nota: Traduzido pelo autor.

Contudo, essa enorme quantidade de automóveis sendo abastecida por combustíveis fósseis causa um grande impacto ao meio ambiente em escala mundial. Então há a necessidade de serem desenvolvidas tecnologias mais eficientes e mais limpas, como a de veículos elétricos.

O número de veículos elétricos no mundo todo tem expandido consideravelmente nos últimos anos, alcançando a marca de 7 milhões de veículos elétricos¹ em 2019, sendo pouco menos de 4,8 milhões deles carros elétricos (BEVs, do inglês *Battery Electric Vehicles*), representando 2,6% do total de vendas de veículos no ano de 2019, com um aumento de 6% em relação a 2018 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2020). O Gráfico 2 apresenta o total de veículos elétricos no mundo. A Figura 2 exibe o *Model 3* da Tesla, modelo de veículo elétrico mais vendido em 2019, com pouco mais de 300 mil vendas (CLEANTECHNICA, 2020).

¹ Contando somente veículos que podem ser abastecidos por eletricidade de maneira direta.

Gráfico 2 – Quantidade total de veículos elétricos no mundo (2010-2019)



Fonte: *International Energy Agency* (2020).

Nota: PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*), são veículos elétricos híbridos, que podem ser carregados a partir da rede elétrica.

Figura 2 – Carro elétrico mais vendido no ano de 2019



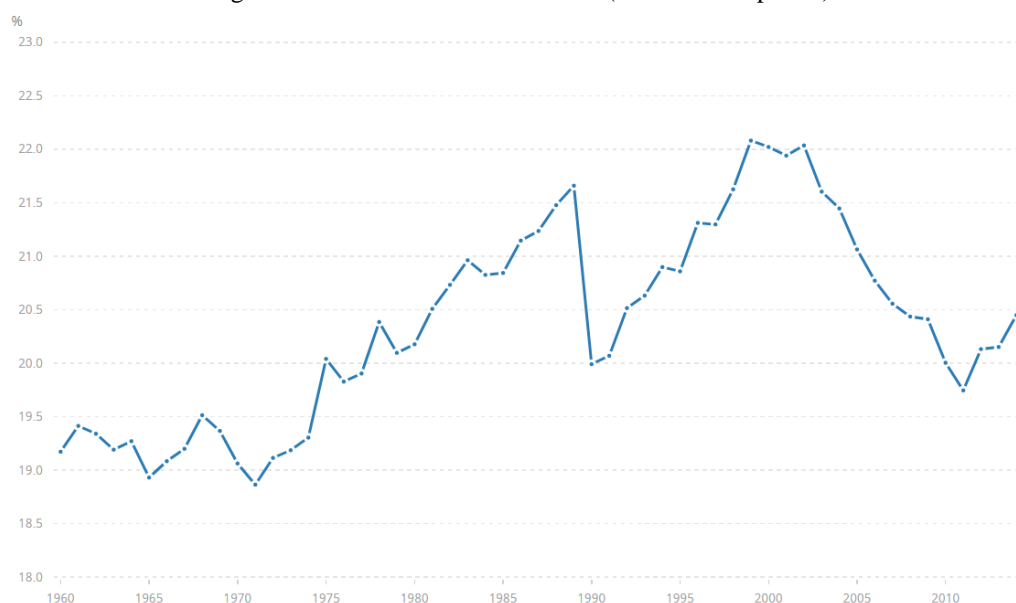
Fonte: Tesla (2021a).

Dado a velocidade do crescimento do número de BEVs na última década, e a grande variedade de novos modelos e versões sendo lançados a cada ano, esse trabalho busca informar sobre as tecnologias adotadas em carros elétricos comercializados nos Estados Unidos da América (EUA), de 2011 ao início de 2021, fornecendo uma visão geral sobre os elementos de um carro movido somente a energia elétrica e apresentando um estudo comparativo entre os diversos veículos analisados.

1.2 Justificativa

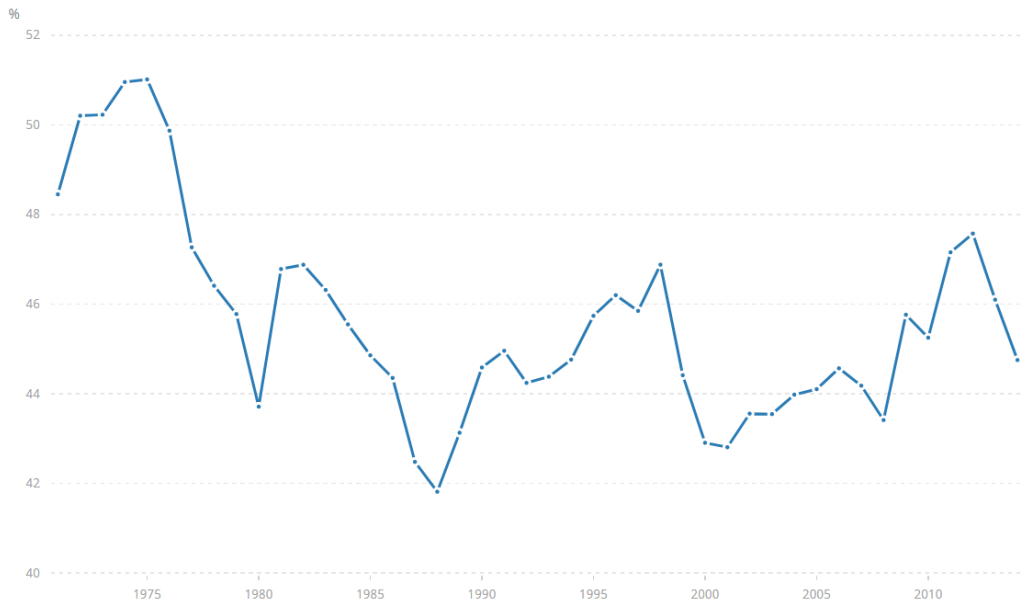
Os meios de transporte² corresponderam mundialmente a 20,45% das emissões de dióxido de carbono no ano de 2014. Em escala nacional, essa porcentagem é mais do que o dobro, correspondendo a 44,75% dessas emissões no território do Brasil (THE WORLD BANK GROUP, 2014). Os números podem ser conferidos no Gráficos 3 e 4.

Gráfico 3 – Porcentagem de emissão de CO₂ no mundo (setor de transportes)



Fonte: *The World Bank Group* (2014b).

² Sem contar voos e embarcações internacionais

Gráfico 4 – Porcentagem de emissão de CO₂ no Brasil (setor de transportes)

Fonte: *The World Bank Group* (2014a).

Dióxido de carbono (CO₂) é um subproduto gerado pela queima de combustíveis fósseis, e é a principal fonte antropogênica causadora do efeito estufa, que afeta a camada de ozônio do planeta terra. Há também a questão da poluição do ar, causada pelos óxidos de nitrogênio (NO_x), principalmente o dióxido de nitrogênio (NO₂), que tem impacto imediato na qualidade de vida das pessoas no mundo todo (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2021b).

Sendo o setor de transportes um dos grandes responsáveis pela emissão desses gases e o petróleo um recurso esgotável, alternativas sustentáveis à utilização de combustíveis fósseis no setor de transporte fazem-se necessárias. Os carros abastecidos somente com energia elétrica possuem zero emissão de gases poluentes durante seu funcionamento. Além disso, o sistema de tração elétrica é mecanicamente mais eficiente do que o motor de combustão interna (ICE, do inglês *Internal Combustion Engine*), os carros elétricos convertem entre 59-62% da energia elétrica da rede para tração nas rodas, enquanto os veículos convencionais à gasolina convertem entre 17-21% da energia armazenada na gasolina em tração (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2017).

Pouco mais de 23 países começaram o processo de eliminação gradual de veículos de ICE, com o intuito de reduzir ou até zerar as emissões de gases poluentes provenientes de veículos. Países como a Alemanha e Islândia, possuem leis já aprovadas que não permitem o registro de veículos com ICE a partir de 2030, ou com políticas ainda mais agressivas, como na Noruega, que pretende vender apenas veículos elétricos a partir de 2025 (BURCH; GILCHRIST, 2018).

Por isso, durante esse estudo, foram analisadas essas questões sob diversos pontos, como por exemplo: a eficiência e maturidade das tecnologias de tração elétrica, tipos e formatos de baterias utilizados, conectores de carregamento, além das barreiras existentes para sua adoção em massa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi realizar um estudo comparativo entre as tecnologias de carros elétricos existentes, levantando dados elétricos, como: potência do motor, eficiência do veículo, capacidade das baterias, autonomia, entre outros, podendo assim utilizar esses dados para a criação de gráficos e tabelas, obtendo-se um material que possibilite a comparação de modo rápido e objetivo entre diversos modelos de carro elétricos disponíveis.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) Apresentar as possíveis configurações de carros elétricos;
- b) Avaliar as tendências de desenvolvimento das principais tecnologias;
- c) Apresentar dados de diferentes modelos de carros elétricos.

Atingindo-se os objetivos, será possível fazer um comparativo entre as principais tecnologias aplicadas em diferentes modelos de carro elétrico e fornecer as estatísticas a respeito dessas informações.

2 CARRO ELÉTRICO

2.1 Introdução

No Brasil, veículos elétricos que usam apenas motores elétricos e baterias, são conhecidos como carros elétricos, diferem dos carros híbridos e a combustão, por não possuírem ICE. Como contam somente com a bateria como fonte de energia, o alcance desses veículos depende quase que diretamente da sua capacidade de armazenamento de energia.

Normalmente percorrem de 100 km a 250 km por carga, enquanto os modelos de primeira linha podem ir muito além, de 300 km a 600 km. O carro Tesla Model S *Long Range Plus* 2020, por exemplo, pode alcançar aproximadamente 640 km no perfil de direção combinado entre cidade e estrada (TESLA, 2020).

Essas distâncias são influenciadas pela forma de condução, configuração do veículo, condições da estrada, clima, tipo de bateria e tempo de uso da mesma, já que normalmente tem sua capacidade reduzida com o decorrer dos ciclos de recarregamento. Uma vez esgotada a energia, o carregamento necessita de muito mais tempo que o reabastecimento de um carro de ICE, que pode levar segundos. Esse tempo depende do carregador e modo de carga utilizados, além da capacidade e estado de carga (SOC, do inglês *State Of Charge*) do banco de baterias.

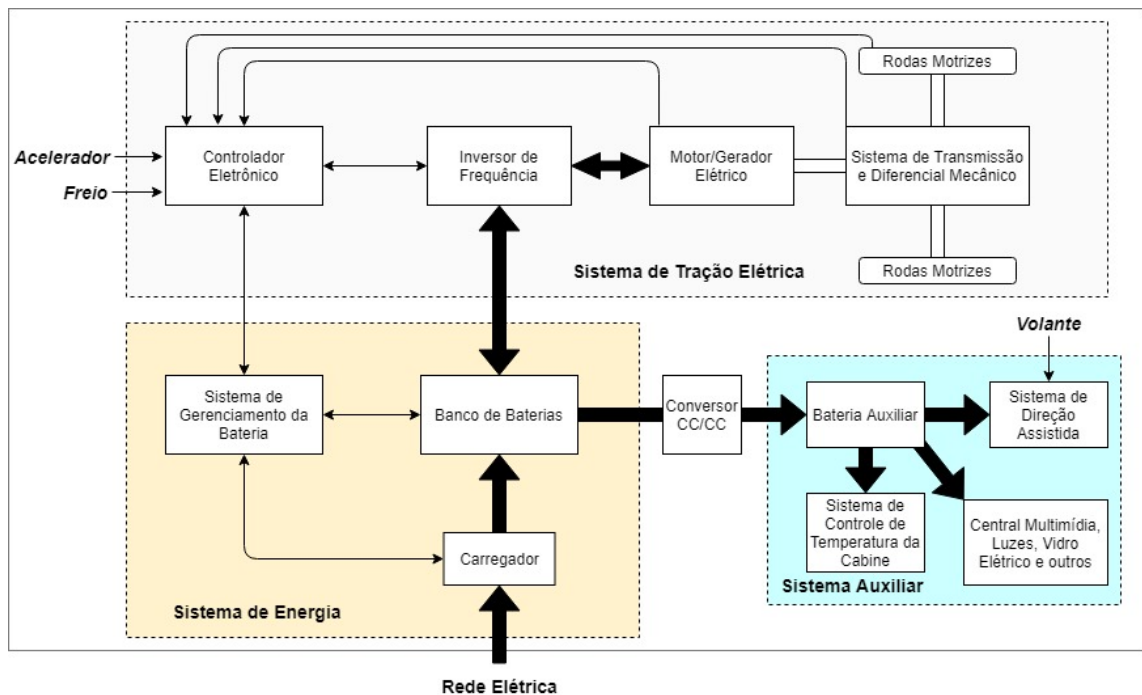
Segundo Freitas (2012), os carros elétricos têm como vantagens, em relação aos demais, sua construção mecânica simples, fácil operação por parte do usuário, além do baixo custo de manutenção do veículo. Não produzem gases do efeito estufa de maneira direta e geram pouco ruído, portanto, são positivos para o meio ambiente. Sistemas de tração elétrica podem entregar torque elevado e instantâneo, mesmo em baixas velocidades, também não consomem energia quando parados. O sistema de recuperação de energia cinética (KERS, do inglês *Kinetic Energy Recovery System*), permite recuperar parte da energia cinética de movimento do veículo, em momentos de desaceleração. Essas vantagens, acopladas com seu limite de distância, tornam este tipo de veículo ideal para o uso em área urbana.

2.2 Visão Geral do Carro Elétrico

Um BEV, ao contrário de seus concorrentes com ICE, é bastante flexível. Isto deve-se a ausência de arranjos mecânicos complexos que são necessários para operar um veículo convencional. A energia flui principalmente por fios elétricos flexíveis ao invés de ligações rígidas e mecânicas.

O carro elétrico incorpora os três principais sistemas: tração elétrica, de energia e auxiliar. O sistema de tração elétrica é formado pelo controlador eletrônico, inversor de frequência, motor elétrico, transmissão e diferencial mecânico, além de rodas motrizes. O sistema de energia inclui o banco de baterias, o sistema de gerenciamento da bateria e o carregador. O sistema auxiliar consiste principalmente da bateria auxiliar e de componentes auxiliares. A Figura 3 apresenta a disposição desses sistemas no carro elétrico.

Figura 3 – Visão geral dos sistemas no carro elétrico



Fonte: Produzido pelo autor.

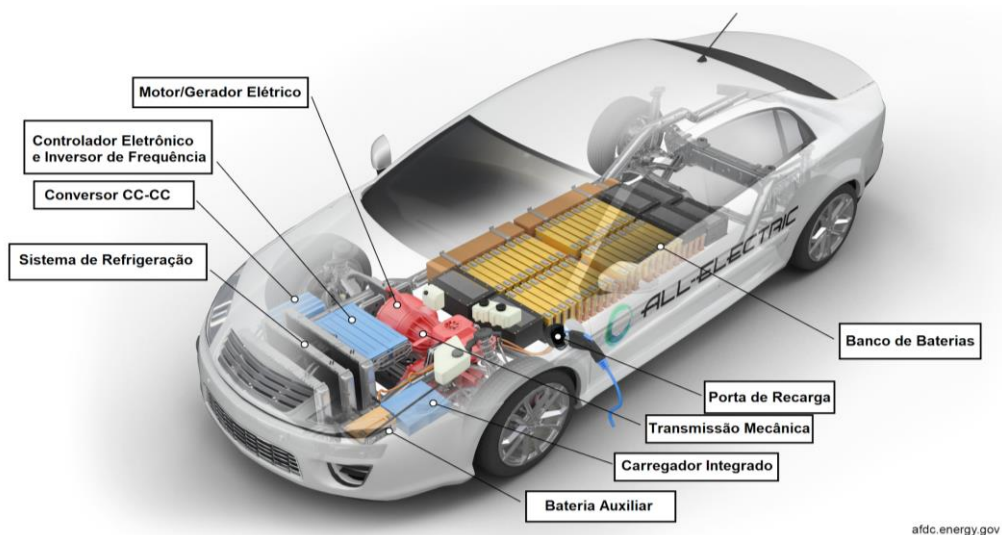
Na Figura 3 uma ligação mecânica é representada por uma linha dupla, ligação elétrica por uma linha grossa e uma ligação de controle por uma linha fina. A seta em cada linha representa a direção do fluxo de energia elétrica ou de comunicação de informações de controle.

De acordo com a ação do motorista nos pedais de freio e do acelerador, o controlador eletrônico fornece os sinais de controle adequados para o inversor de frequência, que regula o fluxo de energia entre o motor elétrico e o banco de baterias.

Um fluxo reverso de energia elétrica é possível, como na frenagem regenerativa. O sistema de gerenciamento da bateria fornece informações do sistema de energia para o controlador eletrônico, que comanda a sequência de disparos no inversor de frequência, permitindo que o motor atue como um gerador elétrico e recupere parte da energia cinética do veículo.

O sistema de gerenciamento da bateria também trabalha em conjunto com o carregador, controlando o carregamento do banco de baterias, além de monitorar a usabilidade do mesmo. A bateria auxiliar fornece a energia necessária para os componentes auxiliares, que utilizam de baixa tensão (12-14V) como alimentação, sendo alguns deles: o sistema de controle de temperatura interna, o sistema de direção assistida, a central multimídia, as luzes, o vidro elétrico e outros. A Figura 4 apresenta um exemplo de possível arranjo desse sistema em uma estrutura veicular.

Figura 4 – Carro Elétrico



Fonte: *Alternative Fuels Data Center* (2021).

Nota: Traduzido pelo autor.

3 SISTEMA DE TRAÇÃO ELÉTRICA

3.1 Introdução

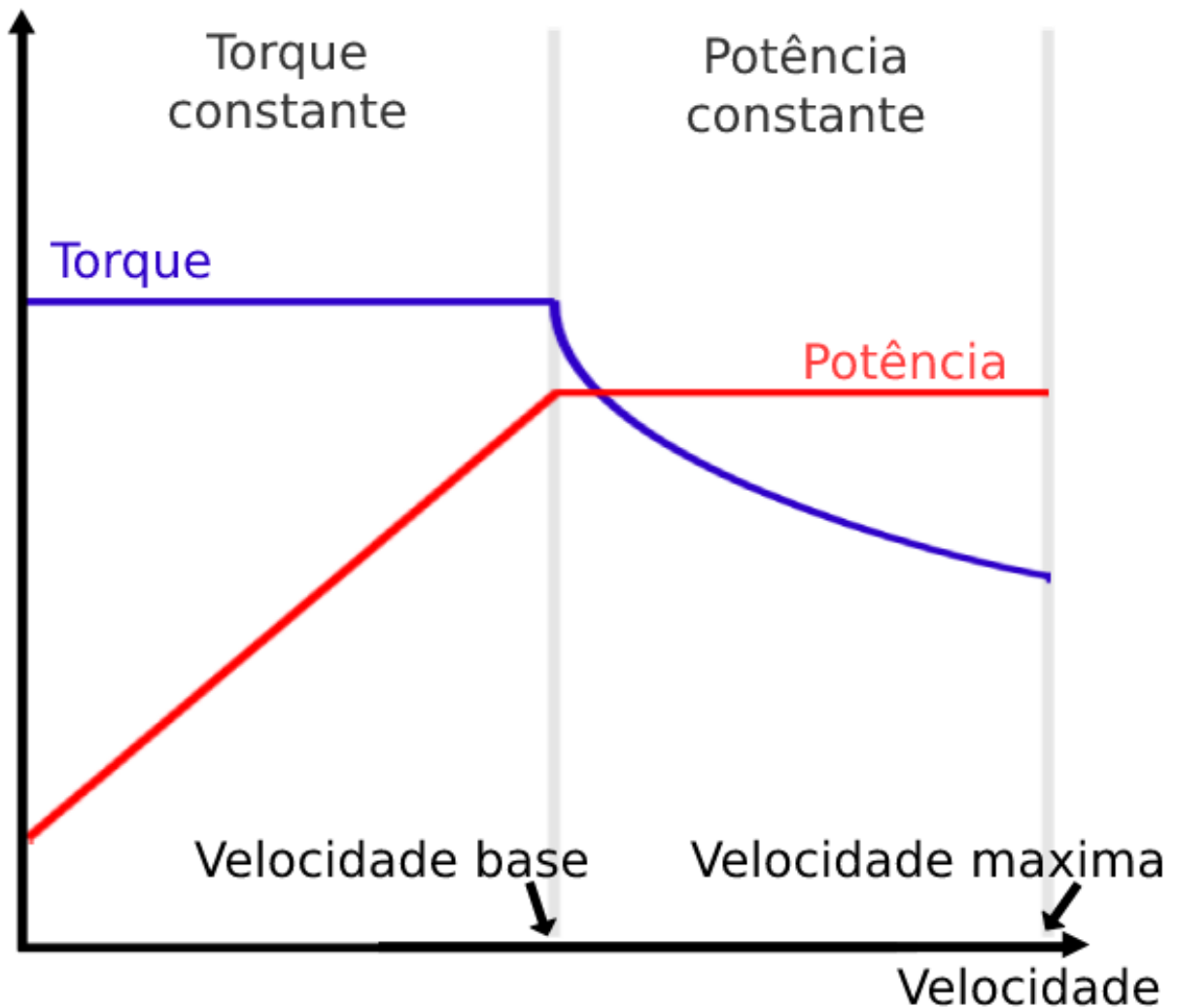
O sistema de tração elétrica pode ser considerado o cérebro e os músculos do BEV, já que controla e gera movimento no veículo. Converte a potência elétrica fornecida pelo banco de baterias em potência mecânica nas rodas motrizes, e vice-versa, com base nas leis do eletromagnetismo.

As principais exigências para com o sistema de tração elétrica em um veículo elétrico, segundo Un-Noor e outros (2017), estão resumidas a seguir.

- Elevada potência instantânea e alta densidade de potência.
- Elevado torque em baixas velocidades para partida e subida, assim como elevada potência em alta velocidade.
- Ampla faixa de velocidade incluindo regiões de torque e potência constante.
- Rápida resposta de torque.
- Alta eficiência dentro de uma larga faixa de velocidades e torque.
- Alta eficiência para frenagem regenerativa.
- Alta confiabilidade e robustez para diversas condições de operação do veículo.
- Custo razoável.

O Gráfico 5, demonstra as curvas características esperadas de um sistema de tração elétrica. Idealmente, na região de torque constante, o motor exerce o torque nominal durante toda a faixa de velocidade até que a velocidade base seja alcançada. Nessa região, o torque diminui proporcionalmente ao aumento da velocidade, para obter-se uma região de potência constante. A velocidade base e a potência constante, mencionadas acima, estão diretamente relacionadas à potência máxima disponível na saída do inversor de frequência (respeitando seus limites de operação), que também depende diretamente da potência máxima disponível no banco de baterias, que é influenciada pelo SOC.

Gráfico 5 – Curva de torque e potência esperadas do sistema de tração elétrica

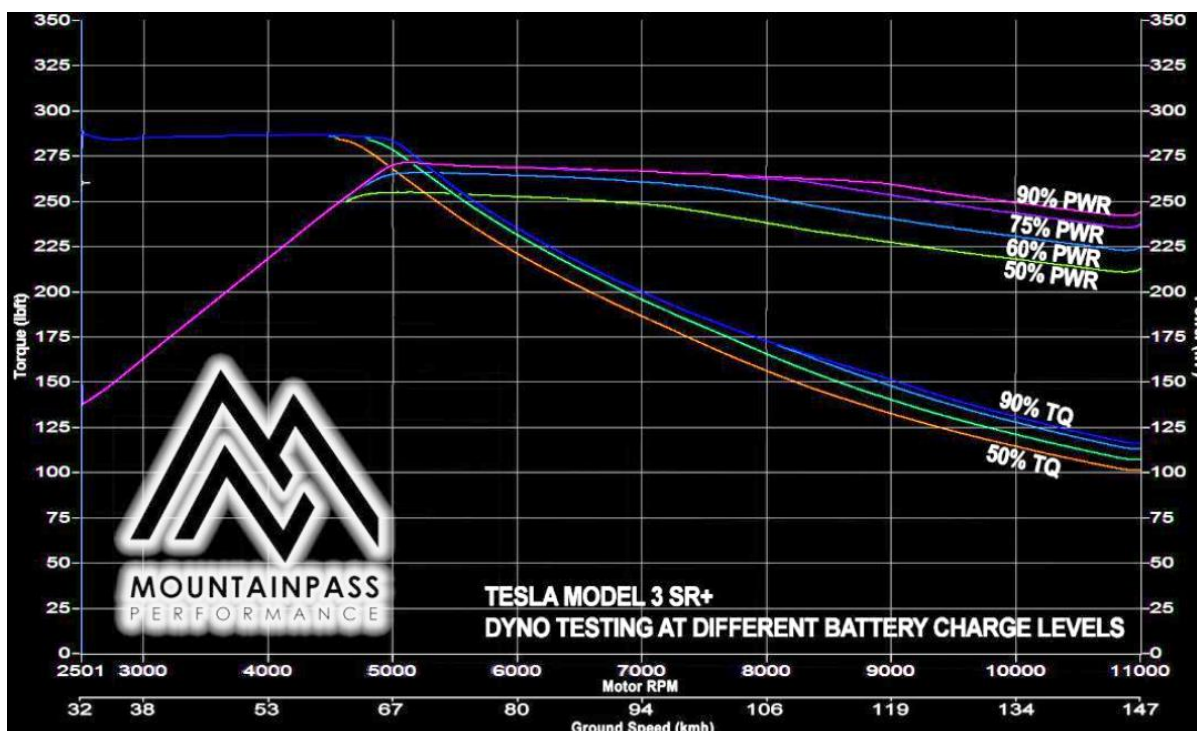


Fonte: Produzido pelo autor.

O Gráfico 6 apresenta as curvas de torque e de potência de acordo com a velocidade, para diferentes SOC's do banco de bateria do Tesla Model 3 *Standard Range Plus*. Os testes foram realizados com o uso de um dinamômetro, aparelho que mede tanto o torque quanto a velocidade de rotação em um eixo. Como a potência mecânica é a multiplicação do torque pela velocidade de rotação, tem-se também a potência mecânica no eixo.

É possível observar no Gráfico 6, que quanto menor o SOC, com menor velocidade o torque começa a diminuir. Outro ponto interessante é a respeito da curva de potência mecânica, que não é constante, e que a partir de certo momento, cai mais rapidamente. Esse comportamento está relacionado à queda de eficiência do sistema em elevadas velocidades.

Gráfico 6 – Curvas de torque e potência (*power*) por velocidade (*rear motor speed*), para diferentes SOC's (o valor percentual acima de cada curva)



Fonte: Mountainpass Performance (2019).

O desenvolvimento de sistemas de tração elétrica para carros elétricos é baseado no crescimento de diversas tecnologias, especialmente de máquinas elétricas, eletrônica de potência e técnicas de controle empregadas. Vale ressaltar que existem diferentes combinações que conseguem atender as exigências citadas anteriormente.

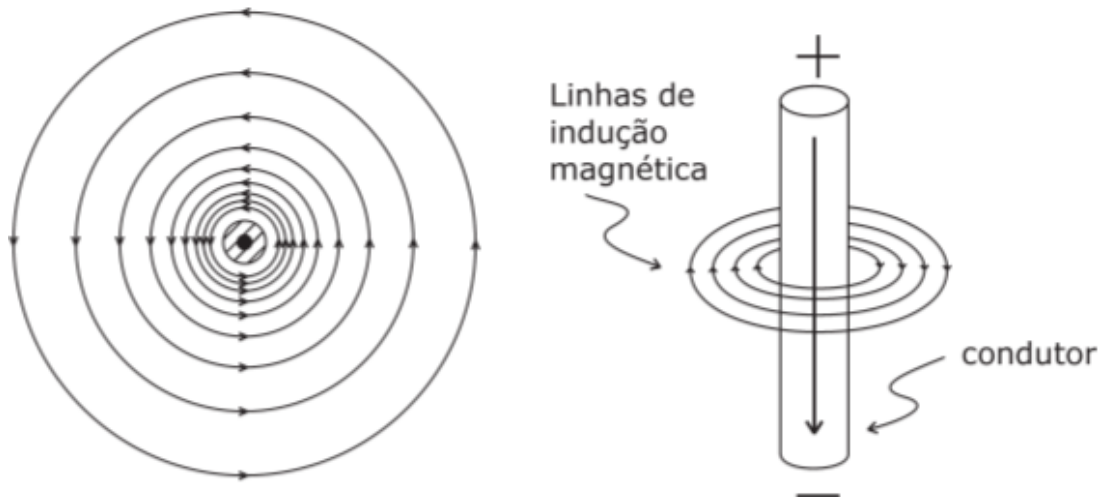
3.2 Máquinas Elétricas

Segundo Villar (2006), máquina elétrica (ME) é um termo geral para máquinas que usam forças eletromagnéticas, como os motores e geradores elétricos, que são conversores eletromecânicos de energia. O gerador elétrico converte potência mecânica em eletricidade, já o motor elétrico faz o processo reverso, diferem apenas no modo de operação (tem a mesma construção). As MEs podem ser divididas entre ME lineares e ME rotativas.

Pelos princípios do eletromagnetismo, um campo magnético pode exercer força sobre cargas elétricas em movimento. Sabe-se que a corrente elétrica é um fluxo de cargas elétricas em

movimento num condutor, portanto, todo condutor percorrido por uma corrente elétrica, imerso num campo magnético, pode sofrer a ação de uma força. Tem-se que uma corrente elétrica que percorre um condutor, produz um campo magnético, representado na Figura 5 pelas linhas circulares chamadas de linhas de indução magnética.

Figura 5 – Representação gráfica das linhas de indução magnéticas em um condutor



Fonte: WEG (2005).

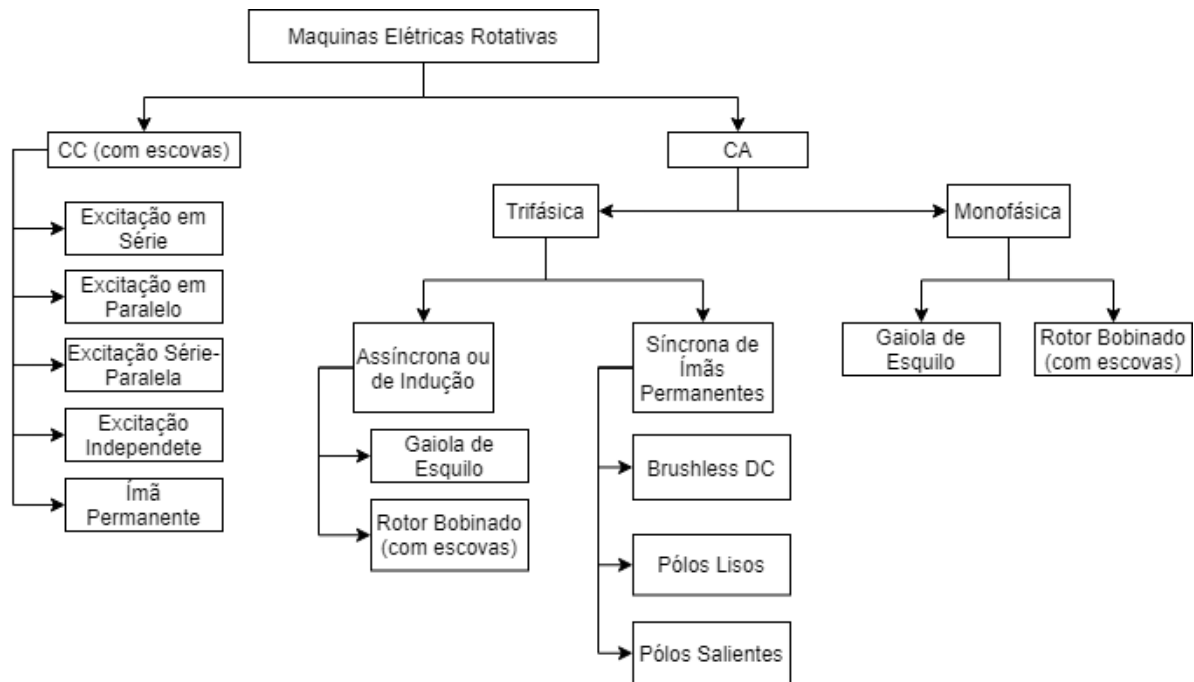
O eletroímã consiste de um fio condutor enrolado em um núcleo feito de material magnético, produz campo magnético com as mesmas características (sentido das linhas de indução) e intensidade proporcional à corrente que circula na bobina. Os ímãs permanentes (IPs) são objetos fabricados com materiais ferromagnéticos duros que são aqueles que, depois de magnetizado, mantém suas propriedades magnéticas até que sejam desmagnetizados. Essas propriedades resultam em dois polos magnéticos opostos (norte e sul), e por possuírem linhas de indução magnética entre os polos, produzem também um campo magnético.

As MEs rotativas são constituídas de duas partes principais: rotor e estator. O rotor é a parte móvel conectada ao eixo da ME. O estator é a parte estática, fixa no interior da carcaça da ME. O espaço entre as duas partes é denominado entreferro. Sabe-se que polos magnéticos opostos se atraem, e polos iguais se repelem. O princípio de funcionamento das MEs rotativas é baseado nessas forças de atração e repulsão.

3.2.1 Tipos de Máquinas Elétricas

Existem diferentes formas de se construir uma ME rotativa que, por sua vez, depende principalmente da forma de alimentação e características de operação esperada da máquina. Essas podem ser classificadas em dois grupos: de corrente contínua (CC) ou de corrente alternada (CA), conforme a Figura 6.

Figura 6 – Classificação das máquinas elétricas rotativas

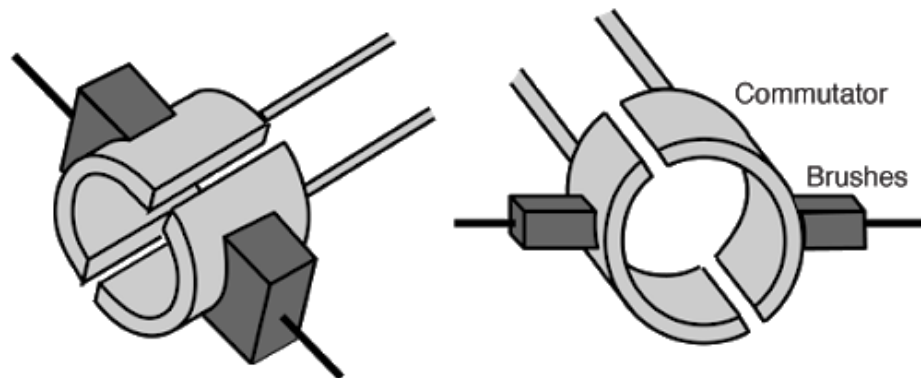


Fonte: Produzido pelo autor.

A ME do tipo *Brushless DC* (BLDC), apesar de possuir corrente contínua (DC, do inglês *Direct Current*) no nome, é uma ME síncrona de CA. Tem esse nome porque foi baseada na ME de CC com escovas (BDCM, do inglês *Brushed DC Machine*), onde a configuração do rotor e estator foram invertidas, colocando os IPs no rotor, com o intuito de eliminar a necessidade do uso de escovas.

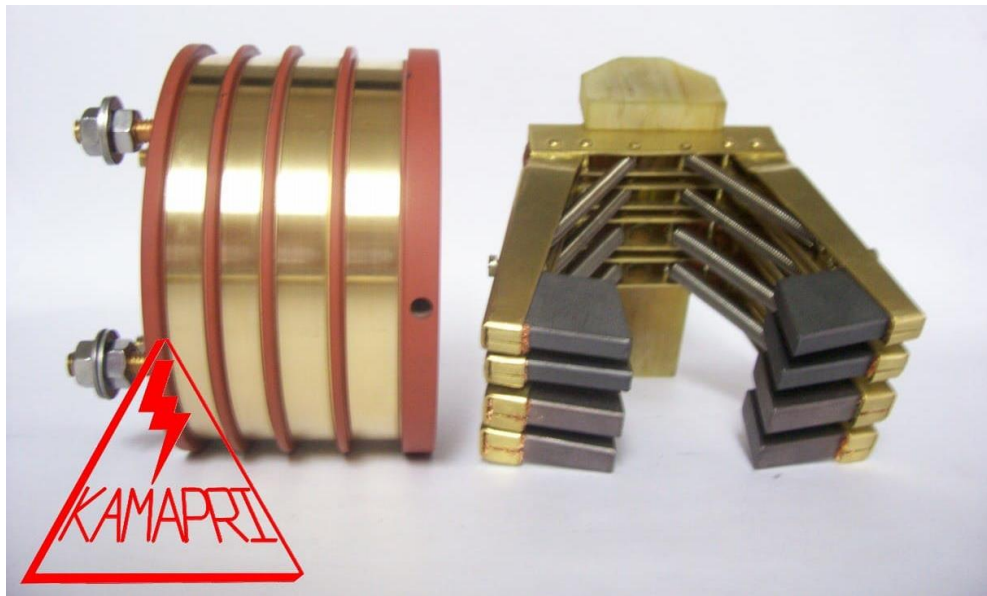
As escovas têm o objetivo de fornecer contato elétrico entre a parte estática e o rotor da ME, por meio do comutador (Figura 7) ou de anéis coletores (Figura 8) montados sobre o eixo da ME. As escovas, que normalmente são feitas de carbono, sofrem desgaste gradual pelo atrito constante, ou seja, necessitam de manutenções periódicas. O comutador tem o objetivo de inverter o sentido da corrente que alimenta o rotor, de acordo com a sua rotação.

Figura 7 – Par de escovas (*Brushes*) e comutador (*Commutator*)



Fonte: *Hyperphysics* (2021).

Figura 8 – Anéis coletores (esquerda) e escovas (direita)



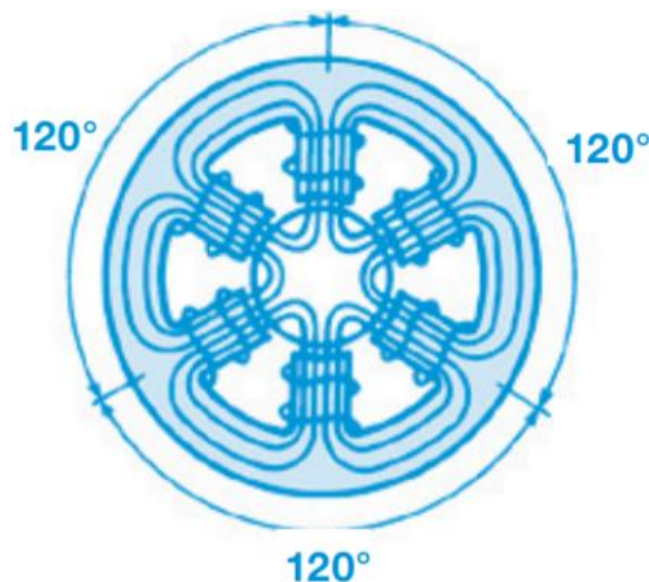
Fonte: Kamapri (2021).

De acordo com Parag e Meikandasivam (2016), ME de CC já foram adotadas em carros elétricos no passado, porém sua baixa eficiência, estrutura volumosa e principalmente a sua baixa confiabilidade devido à constante manutenção pelo uso de comutadores e escovas, são motivos que levaram ao desuso desse tipo de motor pelas fabricantes automotivas.

Segundo Rajashekara (2013), através do avanço de sistemas de controle e eletrônica de potência a partir da década de 90, principalmente do inversor de frequência, diferentes tipos de MEs começaram a ser adotadas para satisfazer as necessidades do setor automotivo. Sendo as máquinas elétricas trifásicas (METs) de CA as principais beneficiadas. A Figura 9 apresenta

um tipo de enrolamento trifásico do estator de uma MET, que é composto por três enrolamentos monofásicos espaçados 120° entre si, cada fase formando um par de polos.

Figura 9 – Enrolamento trifásico



Fonte: WEG (2021).

Tem-se que quando o enrolamento trifásico do estator de uma METs de CA é alimentado por correntes trifásicas, cria-se um campo girante, como se houvesse um único par de polos girantes. O campo magnético produzido tem intensidade e velocidade de rotação proporcionais à corrente e à frequência da alimentação, respectivamente (WEG, 2021). Esse campo girante interage com o campo magnético do rotor e pode produzir forças magnéticas ao longo do eixo transversal do rotor, e conseqüentemente torque no eixo da ME.

As METs de CA podem ser divididas entre síncronas e assíncronas. Sendo as síncronas onde o campo magnético do estator e do rotor tem a mesma velocidade de rotação. As assíncronas, ou de indução como são também são conhecidas, possuem uma velocidade relativa (presença de escorregamento) entre os dois campos magnéticos.

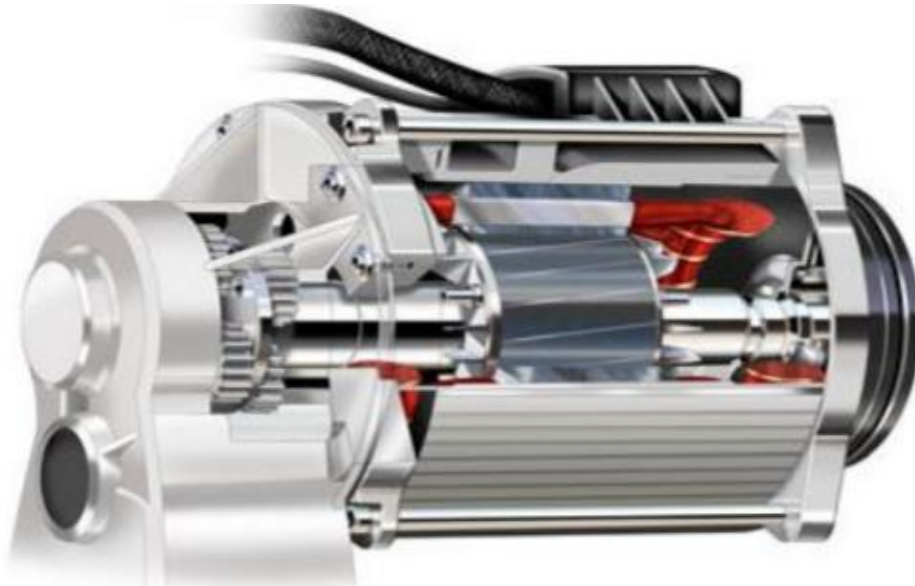
3.2.2 Máquinas de Indução

A máquina de indução (MI) é amplamente aceita como a candidata com maior potencial entre as possibilidades para geração de tração com o uso de eletricidade, não só no setor

automobilístico. Devido a sua confiabilidade, robustez, baixa manutenção, baixo custo e a habilidade de funcionar em ambientes hostis. Como é particularmente bem adequado tanto para ambientes industriais rigorosos, quanto para ambientes de tração veicular (CHANG, 2002).

A Figura 10 apresenta uma MI com rotor em gaiola de esquilo, acoplado a uma caixa redutora de rotação. Esse tipo de rotor é o mais utilizado em automóveis que contam com uma MI, tendo menor custo de produção e exigindo menos manutenção, já que a versão de rotor bobinado conta a presença com escovas. O rotor em gaiola de esquilo é constituído de um conjunto de barras condutoras não isoladas e interligadas por anéis de curto-circuito.

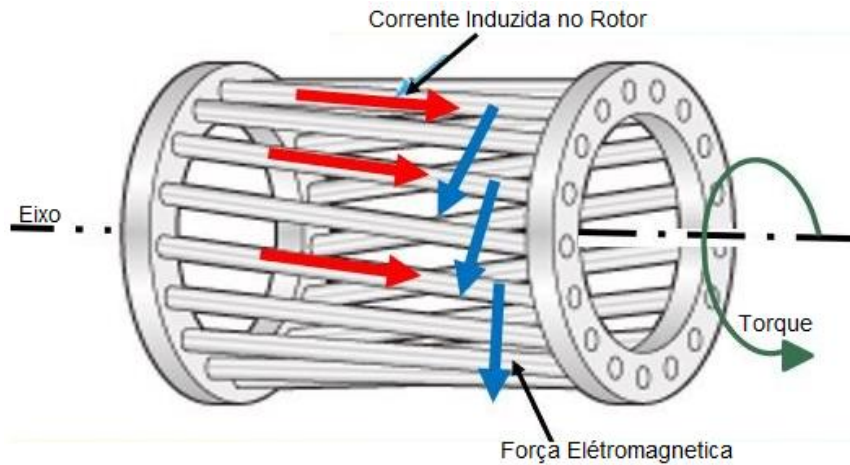
Figura 10 – Motor de indução com rotor em gaiola de esquilo



Fonte: Henrique (2018).

O campo girante produzido pelo estator, induz tensões nas barras do rotor (linhas de fluxo magnético cortam as mesmas), que por estarem curto-circuitadas geram correntes, e, conseqüentemente, um campo no rotor, de polaridade oposta à do campo girante do estator. Como o campo do estator é rotativo e que campos opostos se atraem, o rotor tende a acompanhar a rotação deste campo (WEG, 2021). A Figura 11 demonstra um exemplo de um rotor gaiola de esquilo na presença de um campo girante.

Figura 11 – Interação entre campos no rotor gaiola de esquilo



Fonte: *Flaktgroup* (2020).

Nota: Adaptado pelo autor.

3.2.3 Máquinas Síncronas de Ímãs Permanentes

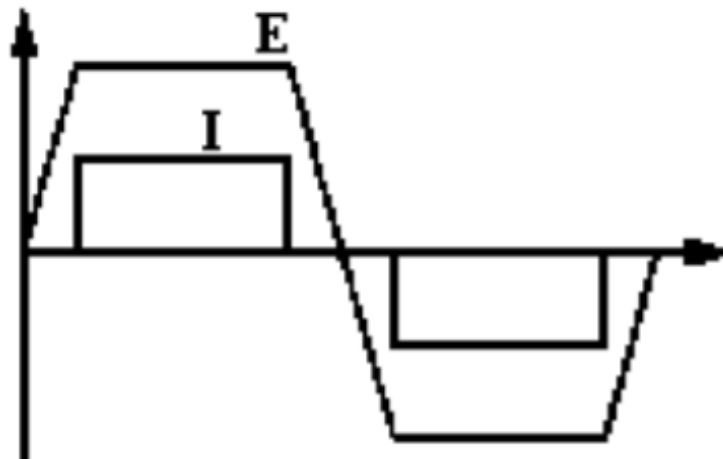
As máquinas síncronas de ímãs permanentes (MSIPs) utilizam IPs no seu rotor, ao contrário das MI que tem um campo induzido no seu rotor, a MSIP possui um campo magnético no rotor pela presença de IPs. Entretanto, para rotacionar o rotor, o campo girante do estator precisa estar devidamente alinhado ao campo constante do rotor, ou seja, é necessário saber a posição do rotor. Dentre os ímãs comumente adotados em MSIPs, a combinação neodímio-ferro-boro (NdFeB) é a mais utilizada, alcançando uma densidade de energia de mais de 400 kJ/m^3 (FREITAS, 2012).

A MSIP pode ser projetada para desenvolver uma forma de onda da força contra eletromotriz (FCEM) trapezoidal, e com o intuito de suavizar o torque a forma de onda da corrente de alimentação deve ser retangular, conforme mostrado na Figura 12. Essa ME é do tipo BLDC, que apesar de permitir um acionamento mais simples, é utilizada somente para aplicações de baixas potências e quando o sistema não necessita de alto desempenho (WEG, 2007).

No setor automotivo, onde é necessário elevada potência e performance, a MSIP é projetada para que a FCEM e a corrente de alimentação sejam senoidais, conforme Figura 13, que resulta em um torque mais suave, ao custo de um controle do acionamento mais complexo. São necessários sensores de corrente em cada fase, além de um sensor de posição de alta resolução

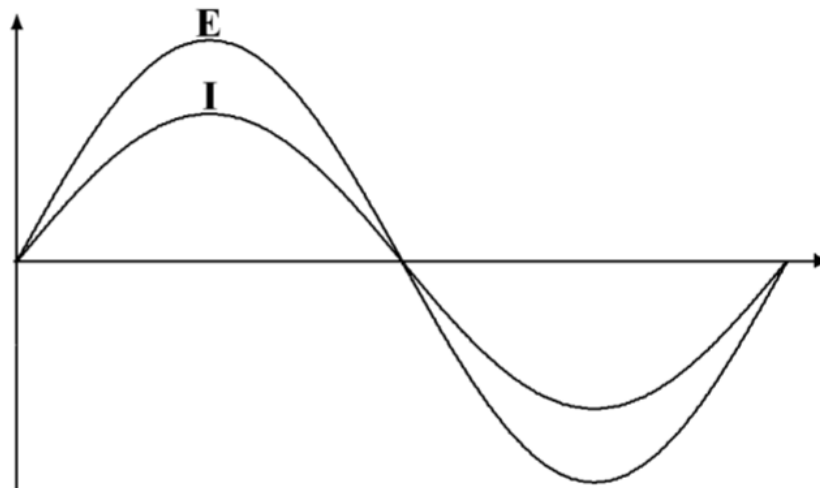
com o intuito de manter a sincronização precisa da forma de onda da corrente com a posição angular do rotor em cada instante de tempo.

Figura 12 – Formas de onda da FCEM (E) e da corrente de alimentação (I)



Fonte: WEG (2007).

Figura 13 – Formas de onda da FCEM (E) e da corrente de alimentação (I)

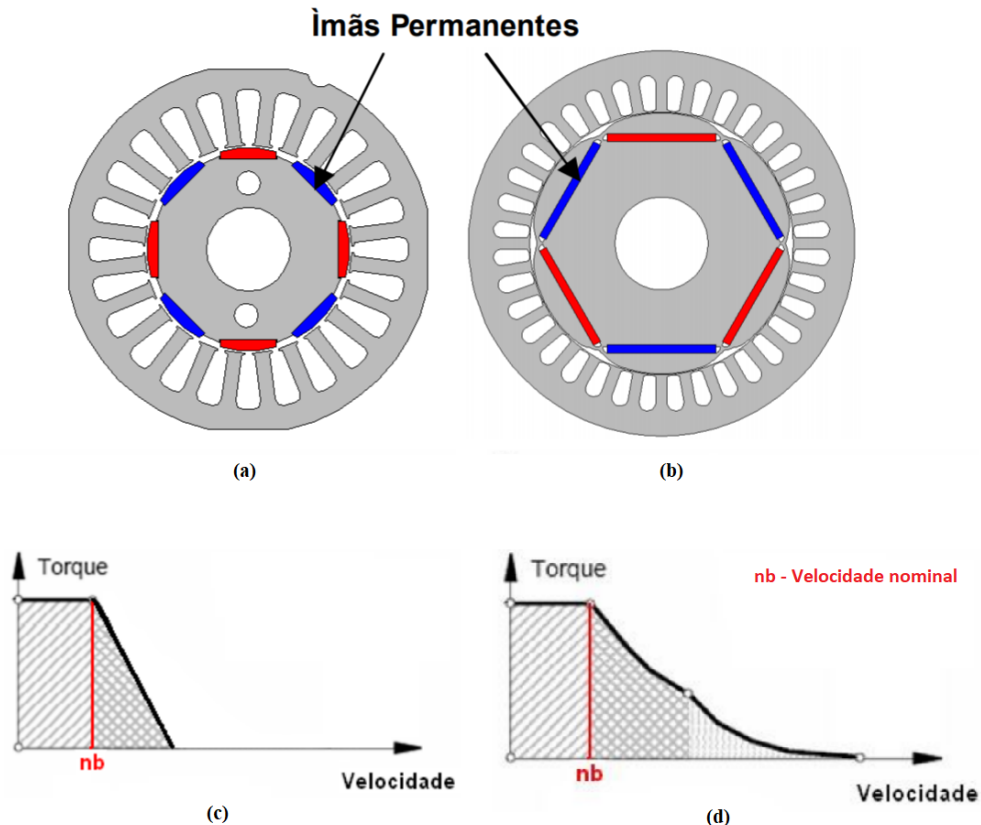


Fonte: WEG (2007).

As MSIPs alimentadas por corrente senoidal podem ser divididas entre as com ímãs superficiais (polos lisos) e as com ímãs internos no rotor (polos salientes), conforme mostrado nas Figuras 14(a) e (b). A máquina síncrona de ímãs permanentes superficial (PMSM, do inglês *Permanent Magnet Synchronous Machine*) apresenta uma limitada capacidade de operar em velocidades acima da nominal, com potência constante, conforme Figura 14(c). A máquina síncrona de ímãs

permanentes internos (IPMSM, do inglês *Interior Permanent Magnet Synchronous Machine*) é capaz de operar em uma grande faixa de velocidade acima da nominal, com potência constante, conforme Figura 14(d).

Figura 14 – (a) MSIP polos lisos; (b) MSIP polos salientes; Curva de torque x velocidade: (c) MSIP polos lisos, (d) MSIP polos salientes



Fonte: WEG (2007).
Nota: Adaptado pelo autor.

Os IPs inseridos no interior do rotor permitem que os IPs fiquem protegidos contra a força centrífuga. Além da proteção extra, esse tipo de ME, possui indutâncias do eixo direto e quadratura diferentes (por conter saliências), produz também torque de relutância que, somado ao torque eletromagnético devido aos ímãs, produz um maior torque resultante. Em contrapartida, aumenta-se a complexidade na fabricação do rotor e conseqüentemente eleva-se seu custo ainda mais.

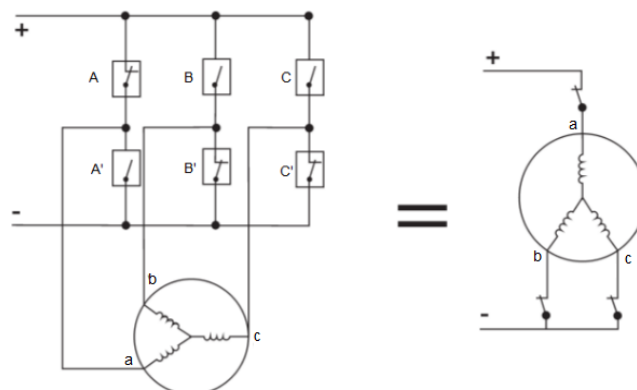
3.3 Inversor de Frequência

Como o banco de baterias fornece uma fase de tensão constante em seus terminais e as METs utilizam de três fases de tensão alternadas e espaçadas 120° entre si, faz-se necessário o uso de um inversor de frequência, que consiste em um circuito de chaveamento eletrônico. O inversor é composto de quatro ou mais chaves, a depender da topologia utilizada e quantidade de fases na saída.

As chaves são implementadas nos inversores de frequência com dispositivos semicondutores chamados de transistores de potência. Existem várias tecnologias de fabricação para esses tipos de transistores. O transistor bipolar IGBT de porta isolada (IGBT, do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*) é o mais utilizado (WEG, 2005).

A Figura 15 apresenta a topologia de inversor trifásico com três braços a três fios, onde cada par de chaves é representado pelas letras A, B e C e seus complementares A', B' e C'. Quando a chave A está fechada, a A' está aberta, e vice-versa, e o mesmo é válido para os outros pares. Os pontos a, b e c são conectados em formato de estrela (Y), formando as tensões V_{ab} , V_{bc} e V_{ac} .

Figura 15 – Inversor trifásico com três braços



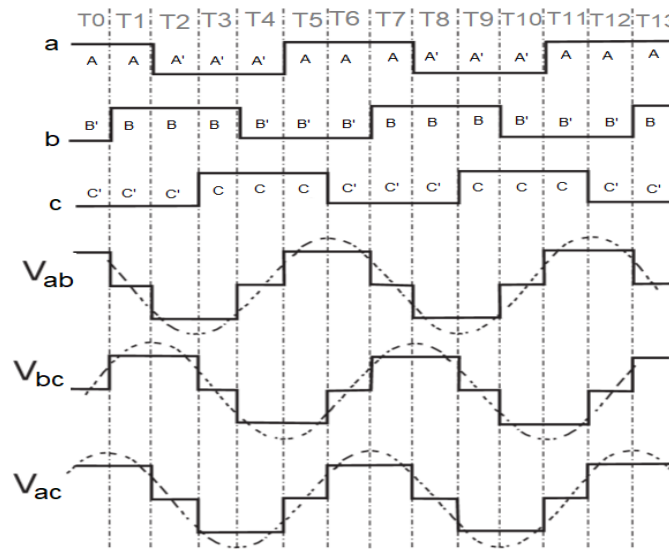
Fonte: WEG (2005).

Nota: Adaptado pelo autor.

Dependendo da combinação de chaves abertas ou fechadas em um determinado período de tempo, pode-se obter na saída do inversor formas de onda diferentes. A Figura 16 apresenta um exemplo de como pode ser gerada uma aproximação de onda senoidal a partir de uma sequência

de chaveamento, com as linhas cheias (V_{ab}, V_{bc} e V_{ac}) representando o resultado dessa combinação.

Figura 16 – Sequência de chaveamento e saída resultante



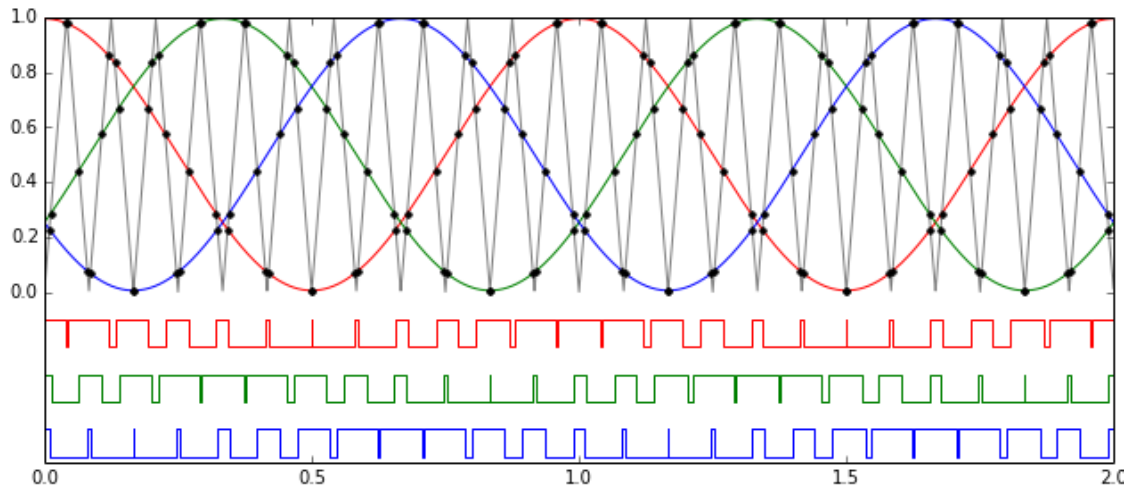
Fonte: WEG (2005).

Nota: Adaptado pelo autor.

A ondas senoidais presentes na Figura 16 pelas linhas tracejadas é apresentada como uma referência para a aproximação da forma de onda. Nota-se que os períodos sem troca de chave (T0-13) são diferentes, e que isso afeta a frequência da onda aproximada nas saídas. Para comandar a combinação de abertura e fechamento das chaves usa-se a estratégia de modulação por largura de pulsos (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*), que permite a geração de ondas senoidais de frequência variável com resolução de até 0,01 Hz. A Figura 17 apresenta um exemplo de como é possível obter a sequência de chaveamento para cada par de chaves, utilizando três ondas senoidais defasadas 120° como referência.

A sequência determinada pelas linhas formando uma onda retangular na Figura 17, é gerada a partir da comparação dos valores da onda senoidal com a onda triangular (onda portadora). Em momentos onde a onda senoidal tem o valor maior que a onda triangular, coloca-se o estado como ligado, já quando o oposto acontece, como desligado.

Figura 17 – Exemplo de PWM de onda triangular



Fonte: Sachs (2021).

3.3.1 Controle Vetorial

O controle vetorial (FOC, do inglês *Field Oriented Control*) possibilita atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controle do torque e da velocidade do motor. Ele decompõe a corrente do motor em dois vetores: um que produz o fluxo magnetizante e outro que produz torque, regulando separadamente o torque e o fluxo magnético (WEG, 2021).

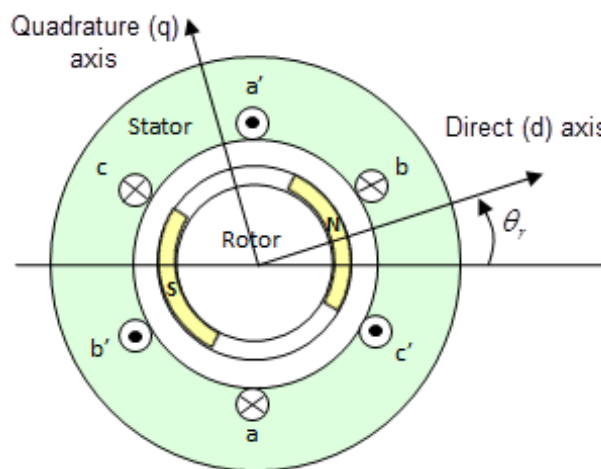
Segundo a WEG (2005), o FOC recebe este nome devido:

- A corrente que circula no enrolamento trifásico da MET pode ser separada em duas componentes: corrente produtora de torque (I_q) e corrente de magnetização (I_d , produtora de fluxo);
- A corrente total é a soma vetorial destas duas componentes;
- O torque produzido no motor é proporcional ao produto vetorial das duas componentes.

É necessário um sensor de corrente para cada fase na saída da ME, e pode ser realizado com ou sem o uso de um sensor de posição do rotor de alta resolução. Sabe-se que sistemas de controle de sinal baseados em PID lidam bem com sinais estáveis de entrada, desde que corretamente ajustados. O FOC utiliza das transformadas de Clarke e Park para transformar uma entrada trifásica de correntes variantes no tempo em dois valores de corrente CC (I_d e I_q) utilizando a posição do rotor.

A transformada de Clarke decompõe o vetor da corrente resultante em dois vetores de corrente ortogonais (I_a e I_b), esses componentes são do tipo senoidais (dependem diretamente das correntes de cada fase). A transformada de Park muda o referencial das correntes I_a e I_b no estator para o referencial rotacional do rotor, tendo como resultado I_q e I_d . Sendo I_q a corrente perpendicular aos polos do campo do rotor (produtora de torque), e I_d a corrente alinhada com os polos (produtora de fluxo). A Figura 18 demonstra a disposição do eixo direto (referente a I_d) e eixo em quadratura (referente a I_q) de acordo com os polos do rotor.

Figura 18 – Eixos d e q em relação aos polos do rotor



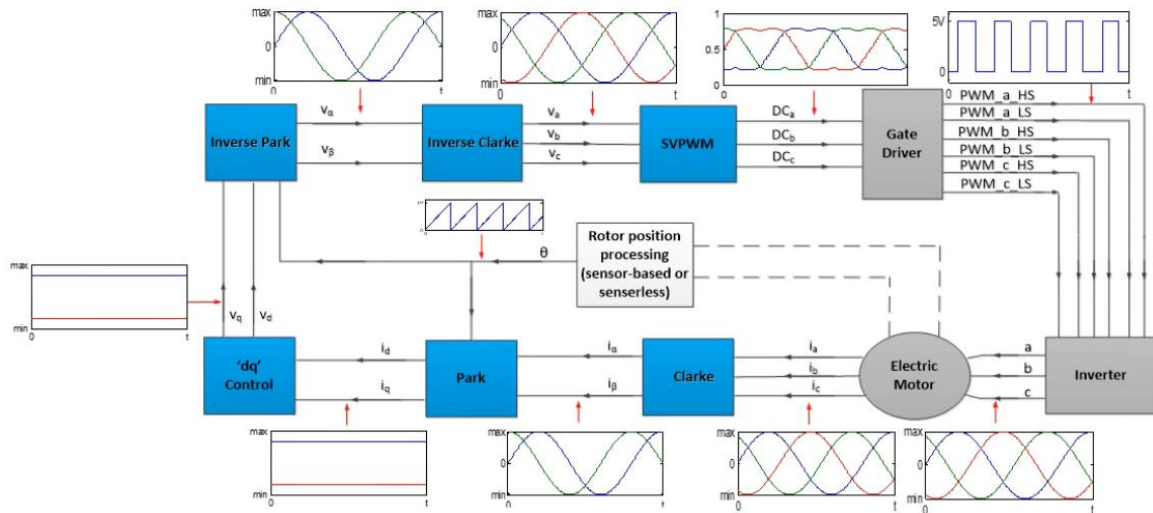
Fonte: *Motion Control Tips* (2021).

O sistema de controle digital pode atuar ajustando os valores de I_d e I_q aos valores de referência desejados, além de realizar as transformadas inversa de Park e de Clarke para que seja obtido o sinal trifásico de referência. Esse sinal é então modulado por um PWM e aplicado nas chaves do inversor, que alimenta a MET. A Figura 19 apresenta um modelo visual desse processo usando um PWM especial, o *Space Vector Width Modulation* (SVPWM), que a partir da injeção do terceiro harmônico no sinal de referência, maximiza a utilização da tensão disponível no barramento CC de entrada do inversor.

Quando um sensor de velocidade é utilizado, permite-se obter uma maior precisão no controle da velocidade e do torque, inclusive no momento de partida. O FOC sem o sensor de posição tem a vantagem de ser mais simples, contudo, apresenta limitações de torque em rotações próximas de zero. A posição do rotor é estimada a partir da FCEM e parâmetros da ME,

entretanto para baixas rotações o valor da FCEM está mais suscetível a ruídos. Em velocidades maiores é praticamente tão bom quanto o FOC com sensor.

Figura 19 – Controle Vetorial com o uso de SVPWM



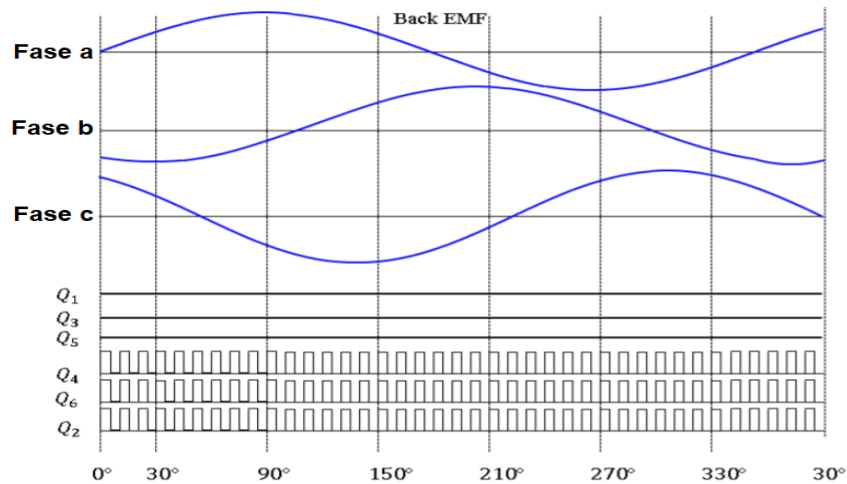
Fonte: Mathworks (2021).

Quando a ME está na região de torque constante, o controlador deve utilizar um sinal de referência nulo para a corrente fluxo (I_d) e o máximo disponível para a corrente de torque (I_q) (dentro das limitações do sistema), com o intuito de maximizar o torque. A partir da velocidade base, entra-se na região de potência constante ou de enfraquecimento de campo como também é conhecida. Sabe-se que o valor da FCEM é diretamente proporcional à velocidade e ao fluxo magnético do rotor, e que a corrente da ME depende da diferença de potencial entre a saída do inversor e a FCEM. Com o objetivo de manter uma diferença de potência, à medida que a velocidade cresce deve-se diminuir o fluxo de campo, isso é possível usando um referencial negativo para a corrente de fluxo (I_d), que consequentemente reduz o fluxo no rotor. Da mesma forma que a referência da corrente de fluxo pode ser negativa, o de torque também, permitindo uma desaceleração mais rápida da ME.

Em momentos de frenagem regenerativa o esquema de chaveamento MERSS (do inglês, *Maximum Energy Recovery Switching Scheme*) apresentado na Figura 20 e 21 é o recomendado, onde somente as chaves da parte inferior são controladas. A ideia do MERSS é utilizar os indutores de fase da ME e as chaves do inversor como um conversor CC-CC do tipo *step-up*, permitindo que as correntes de fase da FCEM sejam direcionadas ao lado positivo do

barramento CC. A Figura 21(a) representa o fluxo das correntes no momento em que as chaves estão ligadas, enquanto a Figura 21(b) no momento em que as chaves estão fechadas, ambas dentro do intervalo de 0-30°. Esse esquema requer o uso de um diodo de roda livre (D1-6) no sentido inverso para cada IGBT (Q1-6).

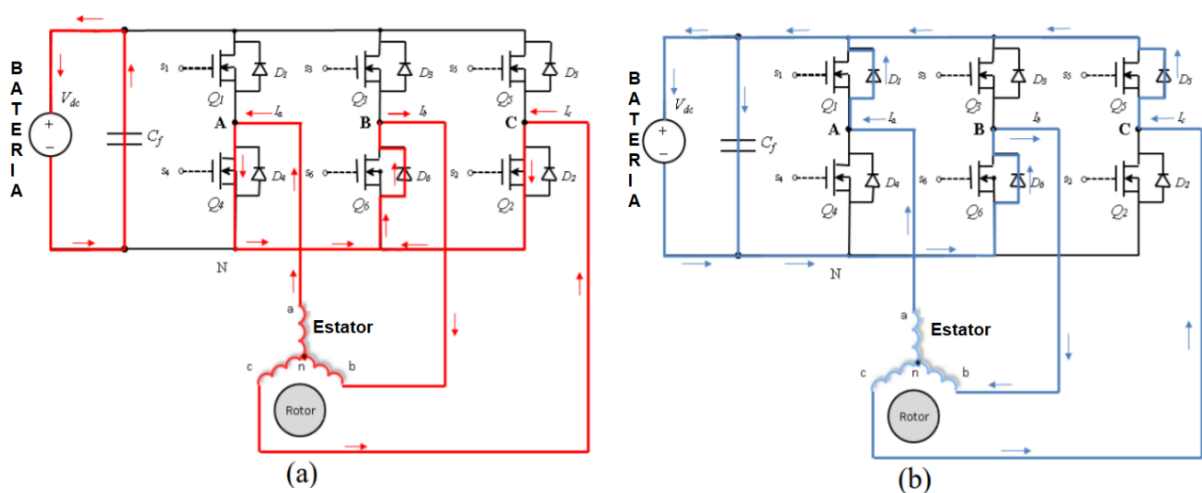
Figura 20 – Esquema MERSS: FCEM e sinais de comando do PWM



Fonte: Adib e Dhaouadi (2018).

Nota: Adaptado pelo autor.

Figura 21 – Esquema MERSS. Fluxo de correntes no período 0-30° quando: (a) chaves ligadas, (b) chaves desligadas



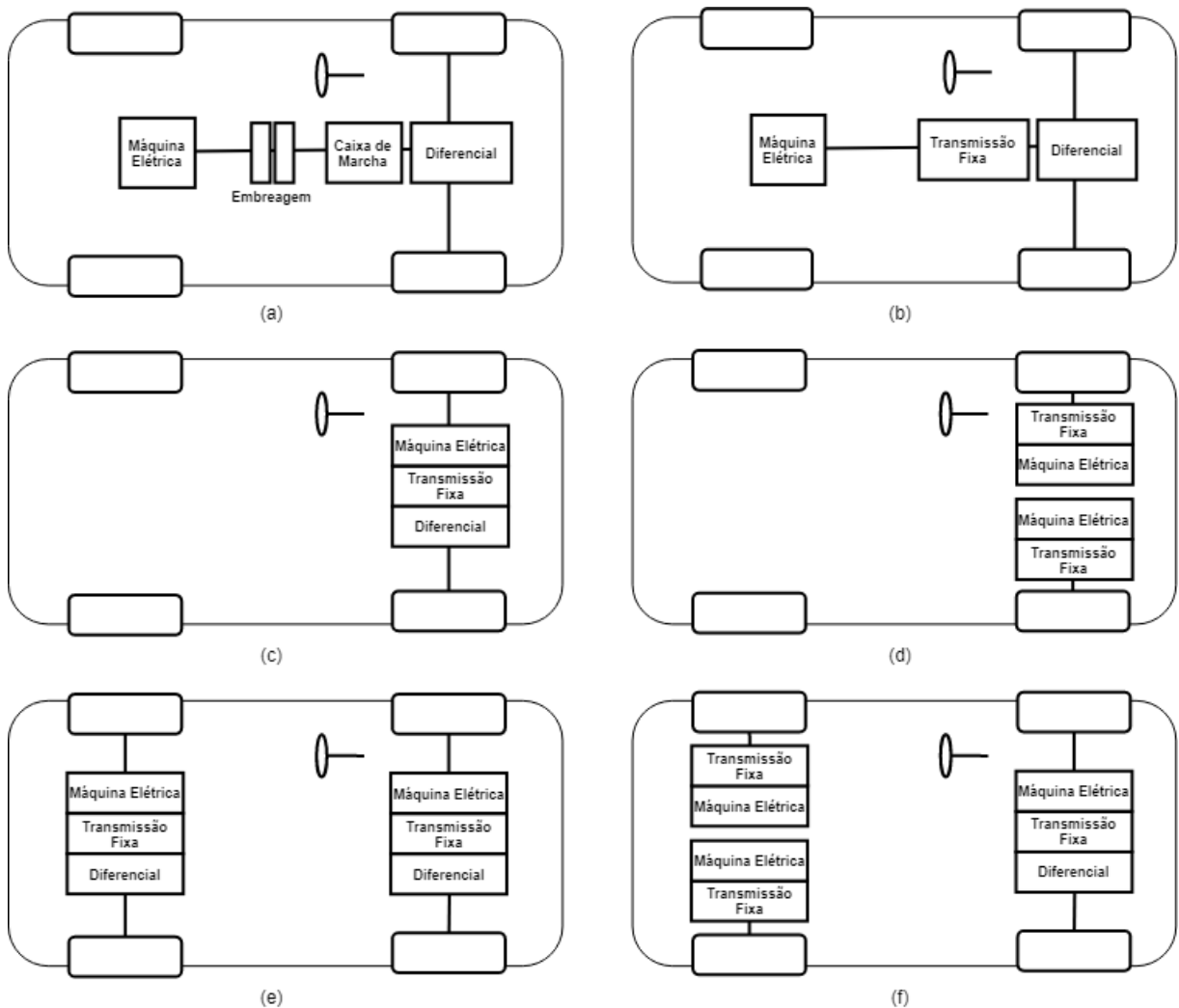
Fonte: Adib e Dhaouadi (2018).

Nota: Adaptado pelo autor.

3.4 Configurações do Trem de Força

O trem de força é o conjunto de componentes responsáveis pela geração e transmissão de força mecânica até o solo, tracionando o veículo. A Figura 22 demonstra as alternativas mais comuns no que se trata de variações no trem de força do veículo.

Figura 22 – Configurações do trem de força. Longitudinal: (a) com embreagem e caixa de marcha e (b) com transmissão fixa. Transversal com tração em um eixo: (c) com diferencial e (d) com duas MEs. Transversal com tração em dois eixos: (e) com diferencial e (f) com diferencial em um eixo e duas MEs no outro



Fonte: Produzido pelo autor.

A primeira alternativa, vista na Figura 22(a), tem-se a configuração mais utilizada em modelos elétricos que foram convertidos de seus modelos à combustão pelo proprietário do veículo, com uma configuração de motor longitudinal. O motor a combustão, localizado na dianteira, é

substituído por uma ME que está conectada à embreagem e uma caixa de marchas, podendo assim, entregar alto torque em baixas velocidades e vice-versa, associado a um maior desgaste mecânico na caixa de marchas e embreagem, conseqüentemente maior custo de manutenção. Possui também um diferencial que permite que as rodas tenham diferentes velocidades nas curvas, onde a roda de fora percorre uma distância maior que a de dentro.

Como segunda alternativa, troca-se a embreagem e a caixa de marcha do veículo por um sistema de relação de transmissão fixa como na Figura 22(b), reduzindo tanto os riscos de falha, tamanho e o peso do sistema de transmissão mecânica. Esse tipo de posicionamento é normalmente utilizado em modelos convertidos pelo fabricante, onde adapta-se o mesmo chassi usado de um veículo a combustão com alinhamento longitudinal para produção de um carro elétrico, tornando a adaptação mais simples.

A Figura 22(c) mostra todo o sistema de tração e transmissão anterior, em uma única montagem com um alinhamento transversal, que aciona as duas rodas. Esta é a configuração mais utilizada entre os veículos elétricos comercializados, como o Leaf da Nissan, modelo lançado em 2010, o primeiro carro elétrico com produção em massa. Essa configuração também pode ser instalada no eixo traseiro.

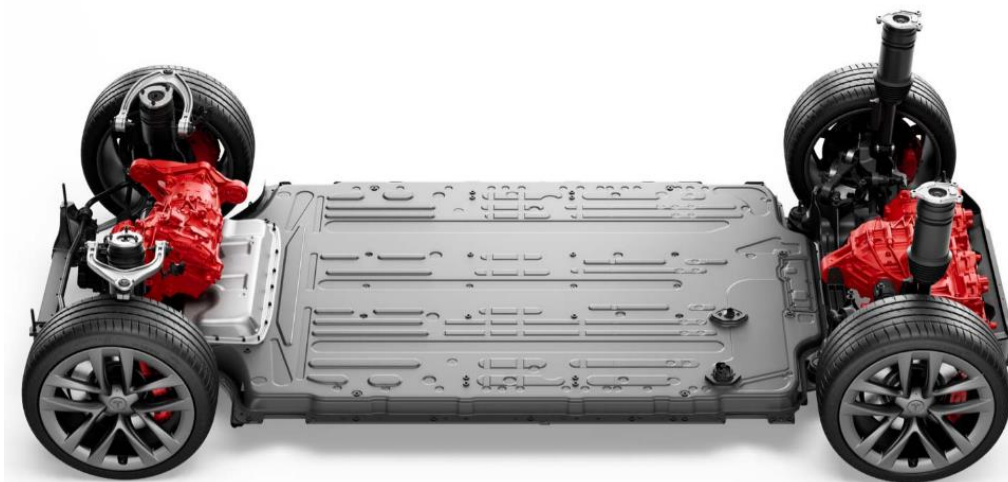
Na Figura 22(d) o diferencial, uma peça mecânica, é substituído por duas MEs, controladas eletronicamente para que tenham velocidades de rotação diferentes tanto em curvas como em estradas irregulares para maior tração do veículo. Essa configuração pode ser instalada no eixo traseiro também.

Para maior estabilidade e potência, pode-se adotar uma configuração de tração nas quatro rodas como na Figura 22(e), onde cada eixo conta com uma ME e seu sistema de transmissão associado, aumentando o custo, peso e a complexidade do sistema. A versão *Long Range* do ano 2021 do *Model S* da Tesla conta com essa configuração, aumentando a capacidade de tração em geral, e principalmente em condições escorregadias e de curva.

Como última alternativa, tem-se a Figura 22(f) com três MEs, uma no eixo dianteiro e duas no traseiro. A versão *Plaid* do ano 2021 do *Model S* (Figura 23) foi apresentada pela Tesla em

2021 como uma opção de elevada potência e utiliza essa configuração, alcançando a incrível marca de menos de dois segundos para acelerar de 0 a 96 km/h (0-60 mph).

Figura 23 – Chassi do *Model S Plaid* 2021, de três MEs da Tesla



Fonte: Tesla (2021b).

A transferência de torque no eixo da ME para o eixo das rodas normalmente tem uma relação de transmissão fixa, determinada pelo fabricante de acordo com as características e uso esperado da máquina. Diferente dos motores a combustão, as MEs conseguem entregar elevado torque mesmo em baixa rotação, eliminando a necessidade de uma transmissão variável com partes móveis, aumentando a durabilidade do trem de força.

Com uma relação fixa, a velocidade máxima do veículo está proporcionalmente ligada à velocidade máxima de operação da máquina. Esse ponto de operação depende de muitos fatores, como o tipo de ME e controle usado, e da forma de refrigeração adotada para garantir a segurança no funcionamento da mesma de forma contínua.

4 SISTEMA DE ENERGIA

4.1 Introdução

O sistema de energia conta com o dispositivo de armazenamento como elemento principal. Nos carros elétricos, a energia, é armazenada na forma de energia química que, por sua vez, ocorre em pilhas eletroquímicas, fornecendo uma tensão em seus polos. Um conjunto de pilhas, também pode ser chamado de bateria.

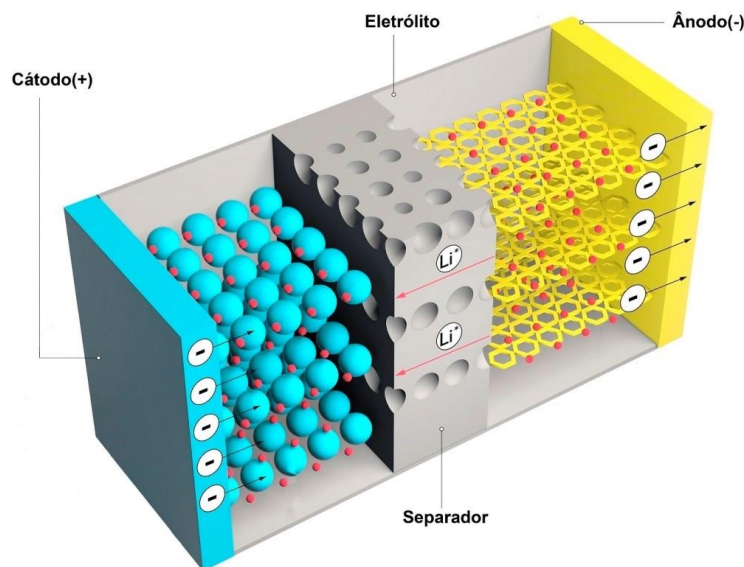
Possui também um sistema de gerenciamento da bateria (BMS, do inglês *Battery Management system*), que faz toda a gestão do fluxo e volume de energia na carga e descarga do banco de baterias, a partir do uso de sensores elétricos e microprocessadores. Como último elemento do subsistema de energia, tem-se o carregador, que controla a transmissão da energia de uma fonte de energia elétrica externa para as baterias do veículo.

Diferentes combinações químicas podem ser utilizadas para armazenar a energia necessária nos carros elétricos. Chang (2002) menciona alguns dos critérios que esses dispositivos devem satisfazer, sendo elevada densidade de energia e de potência as duas mais importantes. Outras características também importantes são: rápida recarga, elevada quantidade de ciclos de recarga, segurança e menor custo.

4.2 Baterias

Segundo Rosolem e outros (2012), a célula de bateria, ou simplesmente célula, é um dispositivo que armazena energia elétrica na forma de compostos eletroquimicamente ativos (energia química), com a capacidade de transformar energia química em elétrica e vice-versa. É composta por quatro elementos principais: cátodo (polo positivo), ânodo (polo negativo), eletrólito e separador, conforme Figura 24. Um conjunto de células de bateria arranjados em série-paralelo formam um banco de baterias, é comum utilizar o termo bateria para se referir ao mesmo.

Figura 24 – Principais elementos de uma célula de bateria



Fonte: Sta-eletronica (2021).

As células de bateria são especificadas em tensão (unidade de medida é Volt, ou V) e capacidade específica, que é a quantidade total de corrente por unidade de tempo que ela é capaz de fornecer até atingir sua tensão final de descarga e é dada pela unidade ampère-hora (Ah). Quando células de bateria são conectadas em série, tem-se que a tensão de cada uma delas é somada, fornecendo uma tensão total de série, mantendo a mesma capacidade específica. Quando conectadas em paralelo, tem-se que a capacidade específica é somada, mantendo a mesma tensão. Portanto, o banco de baterias fornece então uma tensão total e capacidade específica total a depender do arranjo das células.

A energia específica, ou simplesmente capacidade total da bateria, é dada pela multiplicação da tensão e capacidade específica total. Como forma de proteger a bateria, os fabricantes de carros elétricos limitam a capacidade disponível para o seu uso, ou seja, a capacidade anunciada ao consumidor é relativa à capacidade útil.

As baterias tem sido e continuarão sendo a principal fonte de energia para veículos elétricos por um bom tempo. Com isso, diferentes tecnologias foram desenvolvidas e adotadas no decorrer do último século, em um processo contínuo de aperfeiçoamento. O Quadro 1 apresenta informações a respeito de cada tecnologia até o ano de 2010, descrevendo o tipo de bateria, seus componentes básicos de construção e suas principais vantagens e desvantagens.

Quadro 1 – Comparativo de tecnologias de baterias até o ano de 2010

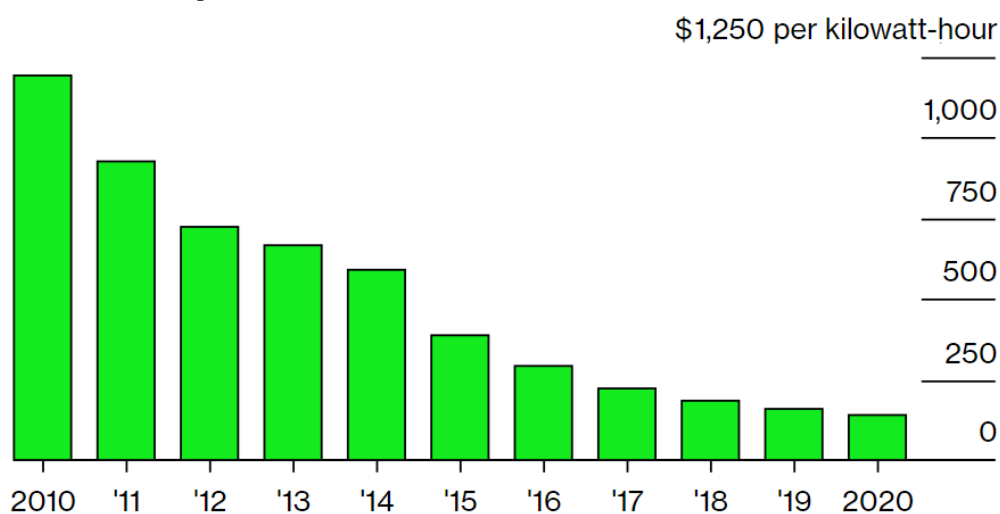
Tecnologia e componentes básicos	Vantagens	Desvantagens
Ácido-Chumbo; Cátodo: Óxido de chumbo; Ânodo: Chumbo esponjoso; Eletrólito: Ácido sulfúrico diluído.	Alta capacidade de produção global; Comparativamente baixa em custo; Tecnologia mais madura, usada a mais de 100 anos;	Não pode ser descarregada abaixo de 20% da capacidade; Baixa densidade de energia e de potência; Tem baixo ciclo de vida se operada com baixa carga; Pode precisar de manutenção.
Níquel-hidreto metálico (NiMH); Cátodo: Hidróxido de Níquel; Ânodo: Liga de Níquel; Eletrólito: Solução alcalina.	Dobro da capacidade específica (normalizado em massa, Ah/kg) em relação a de ácido-chumbo; Segura para o meio ambiente; Reciclável; Operação segura em alta tensão; Ciclo de vida maior em relação a de ácido-chumbo; Larga faixa de temperatura de operação; Segura para sobre carga e descargas.	Se descarregada rapidamente, tem vida útil reduzida para entre 200 e 300 ciclos; Sofre de efeito de memória, tem sua potência reduzida com o tempo.
Níquel-Zinco (Ni-Zn); Cátodo: Oxi-hidróxido de Níquel; Ânodo: Zinco; Eletrólito: Solução alcalina;	Alta densidade de energia; Alta densidade de potência; Utiliza materiais de baixo custo; Pode operar mesmo em baixa capacidade; Segura para o meio ambiente; Faixa de temperatura de -10°C até 50°C;	Rápido acúmulo de detritos em sua estrutura, que trazem inseguranças quanto ao uso automotivo.
Níquel-Cádmio (Ni-Cd); Cátodo: Hidróxido de Níquel. Ânodo: Cádmio. Eletrólito: Solução alcalina.	Longa vida útil; Pode ser totalmente descarregada sem ser danificada; Reciclável.	Caso não seja corretamente descartado, o Cádmio pode causar poluição ao meio ambiente; Elevado custo.
Lítio-íon (Li-ion); Cátodo: Mistura de óxidos de Lítio, Níquel, Manganês e Cobalto. Ânodo: Grafite. Eletrólito: Gel polímero (Li-Po) ou sal de Lítio, em solvente orgânico (Li-ion).	Alta densidade de energia, o dobro em relação a de Níquel-hidreto metálico; Alta densidade de potência; Elevada densidade de energia; Boa performance em elevadas temperaturas; Reciclável; Baixo efeito de memória; Vida útil longa, aproximadamente 1000 ciclos; As versões mais novas, com gel polímero, são mais seguras contra deformações.	Elevado custo; Tempo de recarga ainda longo, porém, melhor que os demais tipos.

Fonte: Khaligh e Li (2010).

Nota: Traduzido e adaptado pelo autor.

Nota-se do Quadro 1 que a bateria de lítio-íon oferece muito mais vantagens do que desvantagens, destacando-se negativamente, na época, por seu elevado custo. Entretanto, segundo a Bloomberg, o valor por quilowatt-hora (kWh), ou valor por energia específica, desse tipo de bateria caiu drasticamente nos últimos anos, de 1.191 dólares em 2010 para 137 dólares em 2020 para cada kWh, uma redução de quase 90%, conforme mostra o Gráfico 7.

Gráfico 7 – Valor por kWh, em dólar, das baterias de lítio-íon



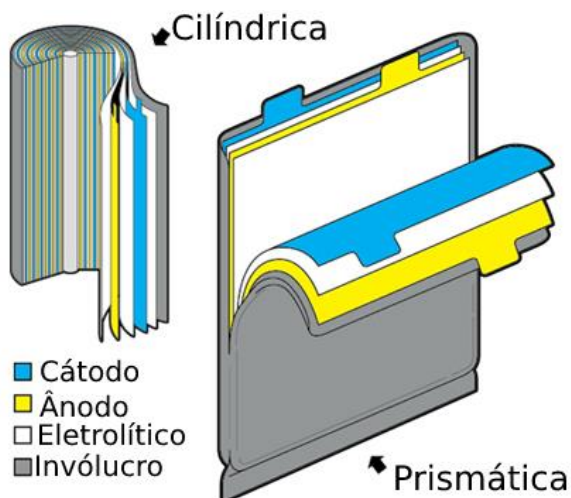
Fonte: Bloomberg (2020).

4.2.1 Baterias de Lítio-íon

De acordo com a revisão das especificações de todos os carros elétricos comercializados nos EUA de 2011 ao início de 2021, a partir de informações do site Fueleconomy.gov do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (US DOE, do inglês *United States Department of Energy*), e todos os modelos, mesmo os mais antigos da lista, utilizam baterias de lítio-íon.

O banco de baterias utilizado em carros elétricos utiliza grande quantidade de células de baterias. O Model S 85 de 2016 da Tesla possui 7104 células (16 módulos com 6 grupos de 74 células em série cada) de lítio-íon no seu banco de baterias com capacidade útil de 85 kWh (ROPER, 2016). Dentre os diferentes formatos desse tipo de bateria, as células da forma cilíndrica ou prismática são as mais comuns, a Figura 25 apresenta a formação dos dois formatos de célula.

Figura 25 – Formato de célula cilíndrica e prismática



Fonte: Blog das Baterias (2013).

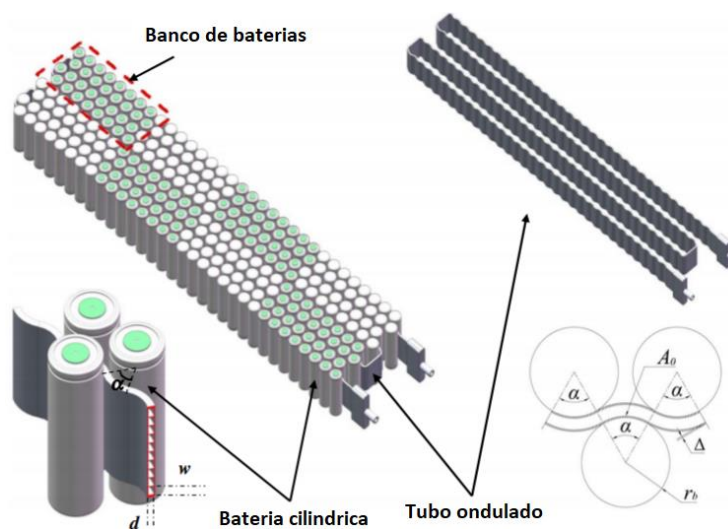
Nota: Traduzido pelo autor.

Um sistema de refrigeração pode ser adotado no banco de baterias para controle da temperatura de uso, otimizando a eficiência e reduzindo o seu desgaste. Esse resfriamento pode ser realizado por ar ou a partir de uma mistura de água deionizada com etileno glicol, prevenindo superaquecimento, congelamento e corrosão dentro do sistema de refrigeração. O sistema também pode contar com um radiador, posicionado na parte frontal do veículo para troca de calor do meio com o ar externo. A Figura 26 demonstra um esquema de resfriamento de células de bateria de lítio-íon de forma cilíndrica e tubo ondulado entre as células.

Segundo Popp e outros (2020), o formato de célula cilíndrica possui larga capacidade de produção global, já que o seu processo de fabricação foi aperfeiçoado e expandido pelas maiores produtoras do mundo de bateria (Panasonic, Sony, Sanyo, Samsung e LG), para atender as demandas de mercado de computadores portáteis e eletrônicos nas últimas décadas. Essas melhorias estão relacionadas também à eficiência energética e design estrutural das células. O formato cilíndrico permite uma velocidade de produção mais rápida da célula, sem diminuição da qualidade da mesma.

Pelo contrário, como avaliado por Schroder, Aydemir e Seliger (2017), o formato permite uma maior segurança estrutural, já que pode ser facilmente encapsulado, de forma igualmente distribuída, por uma estrutura metálica, aumentando a segurança contra vibrações e expansões mecânicas decorrentes das variações de temperatura durante carga e descarga.

Figura 26 – Sistema de resfriamento de células cilíndricas de bateria



Fonte: Tang e outros (2019).

Nota: Traduzido pelo autor.

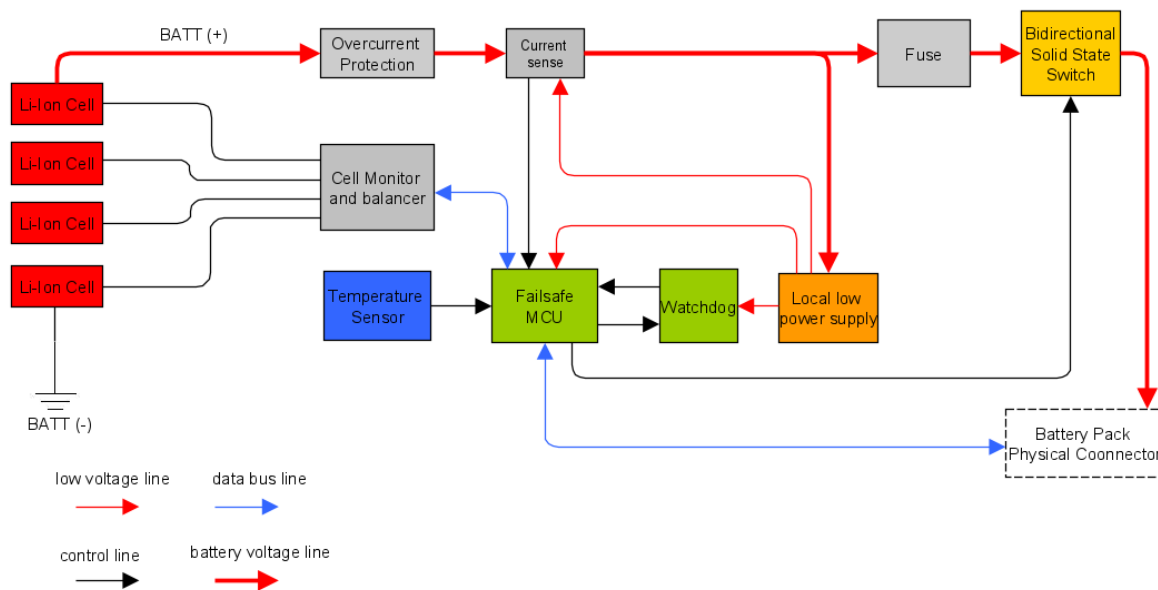
Como forma de evitar um fim prematuro da vida do banco de baterias, todas as células idealmente devem estar no mesmo estado de carga em todos os momentos, degradando igualmente e tendo a mesma capacidade ao longo da vida útil.

Um BMS deve ser adotado a fim de evitar o fim prematuro da bateria, além de fornecer informações da bateria ao condutor como o SOC e capacidade total disponível. O BMS consiste em um sistema que analisa em tempo real um ou mais grupos de células, impedindo condições de risco como: temperatura elevada, sobrecarga, subcarga, curto-circuito externo. Se um dos limites de segurança é ultrapassado, o circuito desabilita o grupo de células ou todo o banco de baterias, prevenindo dano no equipamento. O BMS também pode auxiliar em momentos de frenagem regenerativa e carregamento, otimizando o uso de energia, e consequentemente aumentar a capacidade útil da bateria (CASTRO; BARROS; VEIGA, 2013).

A Figura 27 apresenta um exemplo de BMS que pode ser utilizado, onde um microcontrolador (MCU, do inglês *Microcontroller Unit*) é adotado para o controle do sistema, e conta com um protetor de sobrecorrente (*Overcurrent Protection*), um sensor de corrente (*Current Sense*), um sensor de temperatura (*Temperature Sensor*), um fusível (Fuse), um circuito bidirecional de semicondutores (*Bidirectional Solid State Switch*), um circuito de monitoramento e balanceamento de células (*Cell Monitor and balancer*). A partir de informações fornecidas pelos sensores o MCU atua sobre as células através do circuito de monitoramento e

balanceamento ou sobre o circuito bidirecional de semicondutores. O MCU conta com um *watchdog*, que tem o objetivo de garantir que o MCU está funcionando adequadamente, onde periodicamente o MCU deve fornecer um sinal ao *watchdog*, quando esse sinal não é recebido, o *watchdog* reinicia o MCU.

Figura 27 – Sistema de Gerenciamento da Bateria



Fonte: *All About Circuits* (2021).

4.3 Bateria Auxiliar

A bateria auxiliar faz-se necessária para alimentar os componentes auxiliares do veículo, tais como: vidros elétricos, painel do veículo, luzes, central multimídia, direção assistida, entre outros. O tipo mais utilizado para essa aplicação é a de Ácido-Chumbo, que é o mesmo utilizado na maioria dos veículos com ICE. A sua utilização em massa nas últimas décadas, fez com que os preços desse tipo de bateria fossem drasticamente reduzidos, enquanto a mesma foi aperfeiçoada para máxima segurança durante a operação (BATTERIES INTERNATIONAL, 2021).

4.4 Carregador

O carregador do carro elétrico é responsável por fornecer CC ao banco de baterias do veículo. Como a rede fornece corrente alternada, e em diferentes níveis de tensão, o carregador tem que ser também um conversor de potência. Carros elétricos geralmente possuem um carregador integrado no próprio sistema do veículo para que possam ser carregados em uma tomada comum. Carregadores integrados normalmente fornecem uma carga lenta que pode demorar até 36 horas, dependendo do SOC e capacidade de armazenamento da bateria.

Quando se trata de carregamento rápido do sistema, um carregador externo ao veículo faz-se necessário. O equipamento de abastecimento de veículos elétricos (EVSE, do inglês *electric vehicle supply equipment*), é um tipo de carregador dedicado e que fornece CC diretamente a bateria do veículo, e pode contar com mais de um tipo de conector.

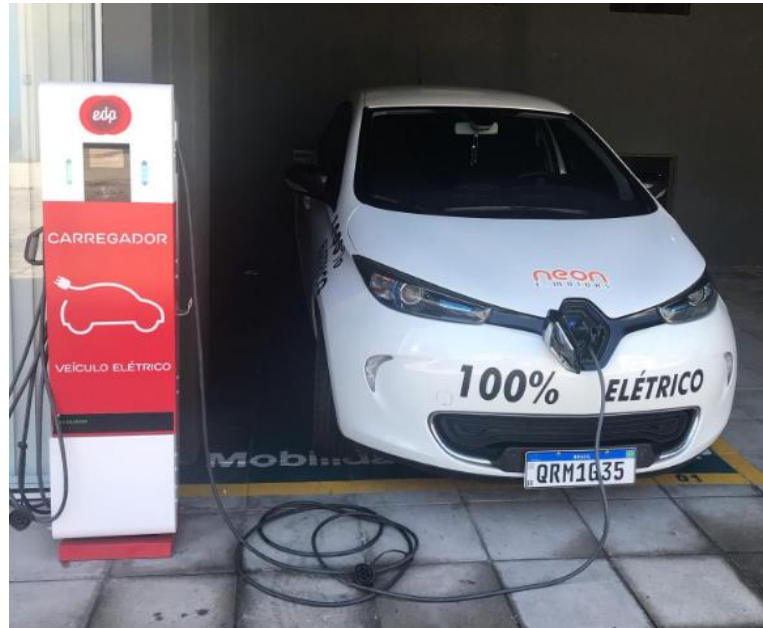
4.5.1 Estações de Carregamento Dedicadas

O EVSE pode ser instalado na garagem do veículo, desde que feitas as alterações necessárias na instalação elétrica do local, ou em pontos públicos e privados espalhados pelo país. Alguns EVSE podem contar com um sistema de carregamento super rápido (depende da compatibilidade do veículo), fornecendo até 400 kW, que pode entregar até 80% de SOC em 30 minutos. A Figura 28 demonstra uma EVSE na sede da EDP (Espírito Santo Distribuição de Energia Elétrica SA) na cidade de Vitória, no estado do Espírito Santo.

Assim como a difusão de postos de gasolina foi necessária para dar suporte a adoção em massa dos carros a combustão, parte fundamental para que o mesmo ocorra com os carros elétricos é a ampliação da quantidade de estações de carregamento disponíveis.

A Holanda, segundo o site *Electromaps* (2021), é o país com a maior quantidade de postos de carga e conta com mais de 29500 pontos espalhados pelo país, que somam mais de 61 mil conectores disponíveis. No Brasil esse número ainda é bem reduzido, pouco mais de 185 pontos com 280 conectores, especialmente levando em conta o tamanho do seu território. A maioria está concentrada na região sul e sudeste do país conforme o mapa da Figura 29.

Figura 28 – Estação de carregamento na sede da EDP em Vitória - ES



Fonte: *PlugShare* (2021).

Figura 29 – Mapa de pontos de carregamento no Brasil



Fonte: *Electromaps* (2021).
Nota: Adaptado pelo autor.

De acordo com Cesar (2021), do site *InsideEVs*, a Estapar, maior rede de estacionamentos do país, Enel X empresa de soluções em energia e a Volvo, fabricante de veículos, firmaram um acordo em dezembro de 2020 para criação de uma rede integrada com 250 estações de recarga em cerca de 100 pontos, localizados nos estacionamentos da Estapar nas Regiões Sul, Sudeste, Nordeste e Distrito Federal do Brasil.

4.5.2 Conectores

Assim como existem diferentes padrões de tomadas ao redor do mundo, diferentes tipos de conectores são adotados pelas marcas de carros elétricos. As normas internacionais IEC-62196-2 e IEC-62196-3 fornecem as orientações para conectores de CA (Figura 30) e CC (Figura 31) respectivamente.

A Tesla tem um conector de design próprio, que é compatível com CC e CA, porém está presente somente em estações da fabricante. Existem adaptadores para todos os outros tipos de conectores, o que torna possível o carregamento em qualquer tipo de estação. A Figura 32 apresenta o conector da Tesla.

Além dos pinos de potência e de aterramento, muitos desses conectores usam também pinos de controle e comunicação a fim de melhorar a performance do sistema. Podem ser adotados pinos de proximidade e de bloqueio para dar mais segurança ao usuário, indicando quando a tomada está de fato inserida e impedindo que a mesma seja retirada durante o processo de carregamento.

Figura 30 – Conectores CA (carregamento lento)



Tipo 1 - SAE J1772

Tipo 2 - MENNEKES

Tipo 3 - SCAME

Fonte: Produzido pelo autor.

Figura 31 – Conectores de CC (carregamento rápido)



Fonte: Produzido pelo autor.

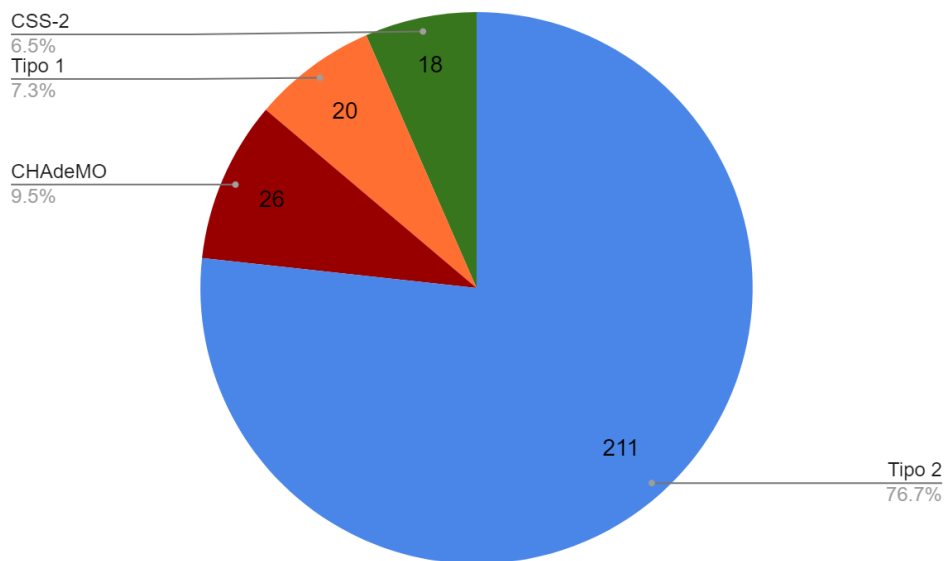
Figura 32 – Conector de CA e CC proprietário da Tesla



Fonte: *The Driven* (2021).

No Brasil, segundo levantamento feito no site *Electromaps*, o conector do tipo 2 é o mais comum nos pontos de carregamento entre os conectores de CA, com um total de 205. Entre os conectores de CC de carregamento rápido, o conector CHAdeMO é o mais comum, com 26, seguido do tipo CCS-2 com 18. O gráfico a seguir traz a distribuição dos conectores por modelo nos pontos de carregamento do Brasil.

Gráfico 8 – Distribuição dos conectores por tipo no Brasil



Fonte: *Electromaps* (2021).

Nota: Produzido pelo autor.

4.5.3 Modos de Carga

Em um veículo elétrico, segundo a norma internacional IEC 62196-1:2014, quatro modos distintos de carga podem ser adotados, cada modo obedece a um dado limite de corrente, tensão e tempo necessário para a carga da bateria (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2014). Sendo assim, o condutor pode optar pelo modo de carga mais adequado para realizar o trajeto programado, levando em consideração a disponibilidade de carregadores, do tempo disponível e SOC da bateria. O Quadro 2 faz uma abordagem geral às características dos modos de carga.

Quadro 2 – Modos de carga de acordo com a IEC 62196-1:2014

Modo de carga	Corrente (A)		Esquema de ligação e tipo de carga	Tipo de ligação
1	Monofásica	16	Cabos padrão de habitação doméstica; Carga muito lenta.	A, B
	Trifásica			
2	Monofásica	32	Proteção de segurança presente no cabo; Carga lenta.	B
	Trifásica			
3	Monofásica	32	Controle e proteção de segurança presente na EVSE; Carga lenta (monofásica) ou rápida (trifásica).	A, B, C
	Trifásica	250		C
4	Monofásica	400	Controle e proteção de segurança presente na EVSE; Carga super rápida (<i>Fast charger</i>).	C
	Trifásica			

Fonte: *International Electrotechnical Commission* (2014).

Nota: Produzido pelo autor. A - Cabo fixo ao veículo. B - Cabo removível do veículo. C - Cabo fixo na estação de carregamento.

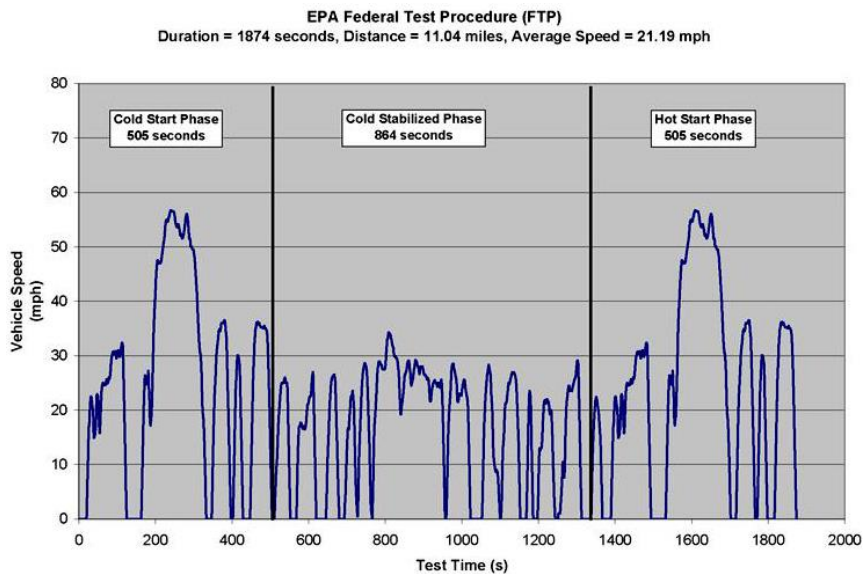
5 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho classifica-se como sendo de abordagem quantitativa e de natureza aplicada, uma vez que tem como objetivo a utilização do levantamento de parâmetros associados aos BEVs existentes para elaboração de tabelas e gráficos comparativos. Quanto aos objetivos, este trabalho é classificado como uma pesquisa descritiva, tendo como finalidade apresentar e comparar as tecnologias adotadas em carros elétricos a partir da coleta de dados oficiais. Do ponto de vista dos procedimentos, possui caráter de pesquisa bibliográfica, onde, a partir de publicações (livros, artigos e conteúdo disponível na internet) foram coletadas as informações necessárias para a realização do estudo.

O site Fueleconomy.gov, do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, é atualizado a cada novo lançamento de BEV no mercado americano com informações do veículo, além dos resultados dos testes da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (USEPA, do inglês *United States Environmental Protection Agency*). Em relação ao sistema de tração elétrica, são disponibilizados dados como a quantidade e tipo de ME utilizada, eixo de tração e potência máxima de tração. Já para o sistema de energia incluem a tecnologia, a capacidade total, a energia específica por massa e o tempo de carregamento do banco de baterias do conjunto.

Os testes da USEPA têm como objetivo avaliar a performance de carros em perfis de condução veicular mais próximos da realidade, com o intuito de informar aos consumidores estatísticas mais precisas sobre os modelos, como eficiência e autonomia do veículo. Contam com três perfis de direção: na cidade, na estrada e do combinado. Os perfis de cidade e estrada tem uma sequência predefinida de velocidade do veículo em um espaço de tempo, já o combinado é calculado de acordo com as médias diárias de locomoção na cidade e na estrada do condutor americano. A Figura 33 demonstra o teste de perfil de condução na cidade. No caso dos carros elétricos, a sequência é realizada repetidamente a partir de SOC 100% até 0%

Figura 33 – Teste da USEPA com perfil de condução na cidade



Fonte: *United States Environmental Protection Agency (2021a)*.

Com o intuito de comparar os diferentes sistemas de tração e de energia, todos os carros elétricos comercializados nos EUA entre 2011 e 2021 foram considerados no estudo, somando um total de 250 diferentes versões e modelos. No APÊNDICE A estão disponíveis informações que foram coletadas, traduzidas e convertidas para unidades utilizadas no Brasil. A partir da análise desses dados, foram elaborados os gráficos e tabelas presentes no estudo comparativo.

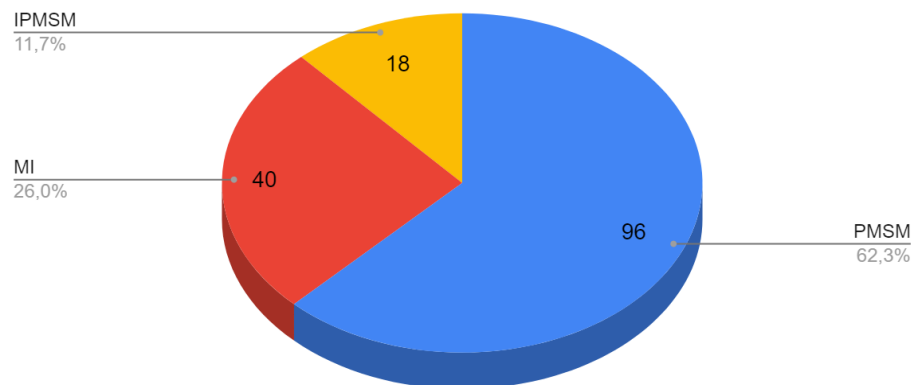
6 ESTUDO COMPARATIVO

6.1 Comparativo dos Sistemas de Tração Elétrica

Dentre os BEVs avaliados, 154 possuem apenas uma ME, 92 possuem duas MEs, e apenas a versão *Long Range Plus* do ano 2020 do Model S da Tesla possui três MEs. Os modelos RAV4 EV (2013 e 2014), e o Scion iQ EV da Toyota não possuem as informações a respeito da ME.

Dentre as diferentes versões dos modelos de apenas uma ME, 74% deles utilizam MSIPs sendo: 62,3% (95) do tipo PMSM e 11,7% (18) do tipo IPMSM. Com apenas 26% (40) utilizando MI, fica evidente a tendência na adoção de MSIPs quando o BEV conta somente com uma ME. O Gráfico 9 apresenta essa distribuição.

Gráfico 9 – Distribuição por tipo de ME em carros elétricos com uma ME

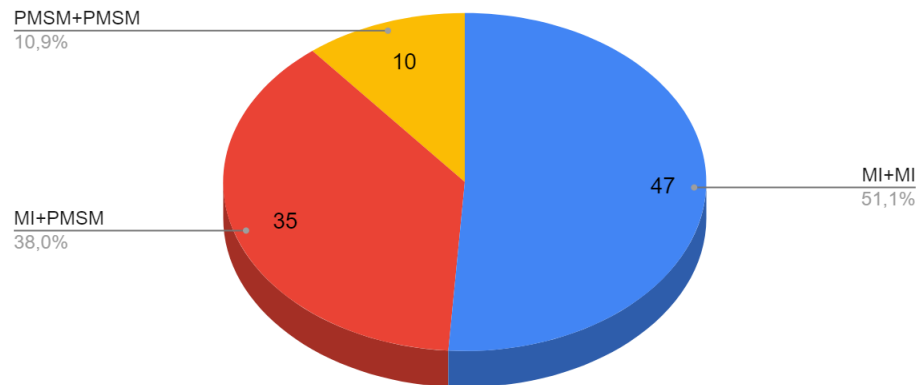


Fonte: *Fuel Economy* (2021).

Nota: Produzido pelo autor.

Dentre as diferentes versões dos modelos com dois motores, 51,1% deles utilizam a combinação de duas MIs, enquanto 38% utilizam a combinação de uma MI e uma PMSM, os demais 10,9% utilizam a combinação de duas PMSMs. Apesar da preferência por MSIPs em BEVs com apenas uma ME, para sistemas de tração com duas MEs, o favoritismo é por MIs. O Gráfico 10 demonstra essa distribuição.

Gráfico 10 – Distribuição por tipo de ME em carros elétricos com duas MEs

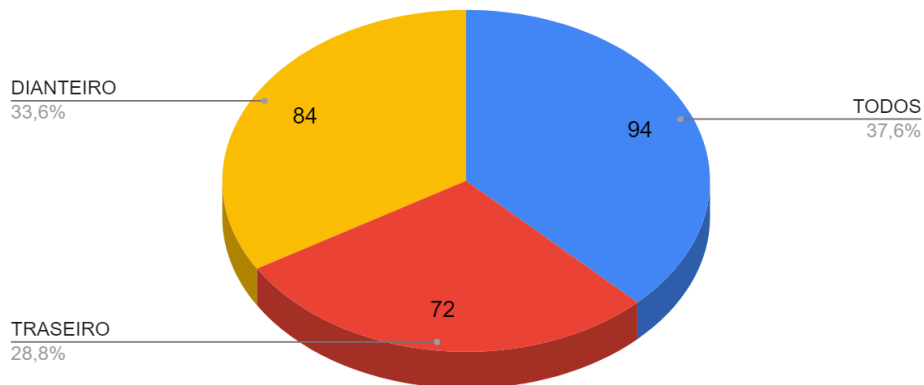


Fonte: *Fuel Economy* (2021).

Nota: Produzido pelo autor.

Dentre os BEVs avaliados a maioria possui tração em todos os eixos, representando um total de 37,6% (94), a segunda configuração mais utilizada é a de tração no eixo dianteiro, com 33,6% (84). Como última alternativa, 28,8% (72) utiliza tração no eixo traseiro, o Gráfico 11 apresenta essa distribuição.

Gráfico 11 – Distribuição a respeito do eixo de tração



Fonte: *Fuel Economy* (2021).

Nota: Produzido pelo autor.

A versão *Long Range Plus* do ano 2020 do *Model S* da Tesla é o único veículo da lista que utiliza três MEs, uma MI para cada roda do eixo traseiro, e uma do tipo PMSM no dianteiro, fornecendo uma potência máxima de 568 kW. A versão *Plaid* do ano 2021 desse mesmo modelo, que ainda não foi lançada, também conta com três MEs.

Dentre todos os BEVs considerados no estudo, a versão *Performance* com rodas de 22 polegadas do ano 2019 do *Model X* da Tesla é o que apresenta a maior potência, com 581 kW,

e utiliza a combinação de uma MI e uma PMSM. Avaliando-se os carros mais potentes, todos os primeiros 21 da lista são da Tesla, divididos entre as diferentes versões dos modelos Model X e Model S, entre os anos de 2014 a 2020. A versão *Performance Battery* do ano 2021 do Taycan 4S da Porsche é o primeiro da lista de outra fabricante, com uma potência máxima de torque de 474 kW entregues por duas PMSMs.

Todas as tabelas desse estudo comparativo foram elaboradas considerando apenas a versão e ano de cada modelo com o melhor desempenho no parâmetro avaliado, permitindo uma análise mais ampla. A Tabela 1 apresenta os modelos com as potências máximas de torque mais altas.

Tabela 1 – Dez carros elétricos mais potentes de modelos diferentes entre os veículos avaliados nesse estudo

Ano	Fabricante, modelo e versão	Potência máxima de torque (kW)	Máquina(s) elétrica(s) adotada(s)	Eixo de tração	Autonomia cidade (km)	Autonomia estrada (km)	Eficiência cidade (Wh/km)	Eficiência estrada (Wh/km)
2019	Tesla Model X <i>Performance</i> (1)	581	MI PMSM	Todos	441	425	261	273
2016	Tesla Model S AWD – P100D	568	MI	Todos	492	558	224	199
2021	Porsche Taycan 4S <i>Performance Battery</i>	474	PMSM	Todos	318	324	267	261
2021	Ford Mustang Mach-E AWD <i>Extended</i>	418	PMSM	Todos	461	401	217	249
2020	Tesla Model Y <i>Performance AWD</i> (2)	377	MI	Todos	486	446	180	199
2020	Tesla Model 3 <i>Long Range AWD</i> P18	358	MI PMSM	Todos	535	514	168	180
2019	Audi e-tron	314	MI	Todos	331	327	280	286
2020	Kia Soul <i>Electric</i>	201	IPMSM	Dianteiro	432	340	168	205
2019	Nissan Leaf (62 kW-hr <i>battery pack</i>)	160	PMSM	Dianteiro	394	325	180	217
2017	Chevrolet Bolt EV	150	PMSM	Dianteiro	411	350	162	193

Fonte: *Fuel Economy* (2021).

Nota: Produzido pelo autor. Dados numéricos arredondados. (1) Com rodas de 22 polegadas (22" *Wheels*). (2) Com rodas de 21 polegadas (21" *Wheels*).

6.2 Comparativo entre Sistemas de Energia

Conforme informado anteriormente, todos os modelos avaliados utilizam baterias de lítio-íon. Dentre todos os BEVs avaliados, a versão *Standard Range Plus RWD* do ano 2021 do Model 3 da Tesla possui a melhor eficiência (em quilowatt-hora por quilômetro) na cidade e na estrada. O Ioniq *Electric* da Hyundai dos anos 2017 a 2019 empata com o Model 3 da Tesla na cidade, entretanto possui uma pior eficiência na estrada. As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam os modelos com a melhor eficiência no perfil de direção combinado, na cidade e na estrada, respectivamente.

Tabela 2 – Cinco modelos diferentes de carros elétrico mais eficientes no perfil de direção combinado avaliados no estudo entre 2011 e início de 2021

Ano	Fabricante, modelo e versão	Capacidade total da bateria (kWh)	Energia específica (Wh/kg)	Tempo de carga em 240V (h)	Eficiência no perfil combinado (Wh/km)	Eficiência na cidade (Wh/km)	Eficiência na estrada (Wh/km)	Autonomia na cidade (km)
2021	Tesla Model 3 <i>Standard Range Plus RWD</i>	57	145	7,8	149	137	155	447
2017	Hyundai Ioniq <i>Electric</i>	28	104	4,0	155	137	174	218
2021	Tesla Model Y <i>Standard Range Plus RWD</i>	57	160	8,0	162	149	174	421
2014	BMW I3 BEV	22	93	4,0	168	155	186	143
2020	Hundai Kona EV	64	141	9,0	168	155	193	457

Fonte: *Fuel Economy* (2021).

Nota: Produzido pelo autor. Dados numéricos arredondados.

Tabela 3 – Cinco modelos diferentes de carros elétrico mais eficientes na cidade avaliados no estudo entre 2011 e início de 2021

Ano	Fabricante, modelo e versão	Capacidade total da bateria (kWh)	Energia específica (Wh/kg)	Tempo de carga em 240V (h)	Eficiência no perfil combinado (Wh/km)	Eficiência na cidade (Wh/km)	Eficiência na estrada (Wh/km)	Autonomia na cidade (km)
2021	Tesla Model 3 <i>Standard Range Plus RWD</i>	57	145	7,8	149	137	155	447
2017	Hyundai Ioniq <i>Electric</i>	28	104	4,0	155	137	174	218
2021	Tesla Model Y <i>Standard Range Plus RWD</i>	57	160	8,0	162	149	174	421
2013	Toyota Scion iQ EV	12	55	4,0	174	149	199	68
2014	BMW I3 BEV	22	93	4,0	168	155	186	143

Fonte: *Fuel Economy* (2021).

Nota: Produzido pelo autor. Dados numéricos arredondados.

Tabela 4 – Cinco modelos diferentes de carros elétrico mais eficientes na estrada avaliados no estudo entre 2011 e início de 2021

Ano	Fabricante, modelo e versão	Capacidade total da bateria (kWh)	Energia específica (Wh/kg)	Tempo de carga em 240V (h)	Eficiência no perfil combinado (Wh/km)	Eficiência na cidade (Wh/km)	Eficiência na estrada (Wh/km)	Autonomia na cidade (km)
2021	Tesla Model 3 <i>Standard Range Plus RWD</i>	57	145	7,8	149	137	155	447
2017	Hyundai Ioniq <i>Electric</i>	28	104	4,0	155	137	174	218
2021	Tesla Model Y <i>Standard Range Plus RWD</i>	57	160	8,0	162	149	174	421
2014	BMW I3 BEV	22	93	4,0	168	155	186	143
2017	Volkswagen e-Golf	41	104	5,3	174	168	186	210

Fonte: *Fuel Economy* (2021).

Nota: Produzido pelo autor. Dados numéricos arredondados.

No que diz respeito a autonomia dos BEVs avaliados, a Tabela 5 apresenta os cinco modelos com a maior autonomia para os três perfis de direção dos testes da USEPA. Nota-se que o primeiro colocado da lista não é o que possui a maior capacidade total, e que a energia específica por massa tem grande influência na autonomia final dos veículos, já que está correlacionada com o peso total do sistema.

Tabela 5 – Cinco modelos diferentes de carros elétrico com maior autonomia em todos os perfis de direção no estudo entre 2011 e início de 2021

Ano	Fabricante, modelo e versão	Capacidade total da bateria (kWh)	Energia específica (Wh/kg)	Tempo de carga em 240V (h)	Eficiência na cidade (Wh/km)	Autonomia na cidade (km)	Autonomia no perfil combinado (km)	Autonomia na estrada (km)
2020	Tesla Model S <i>Long Range Plus</i>	98	170	15,3	174	670	647	618
2021	Tesla Model X <i>Long Range Plus</i>	110	165	15,0	193	615	597	573
2021	Tesla Model 3 <i>Long Range AWD</i>	85	165	11,2	149	595	568	537
2021	Tesla Model Y <i>Long Range AWD</i>	85	165	10,0	162	551	525	492
2021	Ford Mustang Mach-E <i>California Route 1</i>	116	166	11,4	193	521	491	454

Fonte: *Fuel Economy* (2021).

Nota: Produzido pelo autor. Dados numéricos arredondados.

A Tabela 6 apresenta os cinco carros elétricos com a maior capacidade total de bateria, de modelos diferentes dentre os carros avaliados, sendo que a capacidade total é diferente da capacidade útil. A versão *California Route 1* do ano 2021 do Mustang Mach-E da Ford conta com 98,8 kWh de capacidade útil, enquanto a versão *Performance* do ano 2021 do Model S da Tesla com 100 kWh.

Tabela 6 – Cinco modelos diferentes de carros elétrico com maior capacidade total do banco de baterias no estudo entre 2011 e início de 2021

Ano	Fabricante, modelo e versão	Capacidade total da bateria (kWh)	Energia específica (Wh/kg)	Tempo de carga em 240V (h)	Eficiência na cidade (Wh/km)	Eficiência na estrada (Wh/km)	Autonomia na cidade (km)	Autonomia na estrada (km)
2021	Ford Mustang Mach-E <i>California Route 1</i>	116	166	11,4	193	224	521	454
2021	Tesla Model S <i>Performance</i> (19" Wheels)	110	165	14,7	186	199	641	601
2021	Tesla Model X <i>Long Range Plus</i>	110	165	15,0	193	205	615	573
2021	Porsche Taycan <i>Performance Battery Plus</i>	110	151	10,5	292	261	344	386
2021	Audi e-tron	95	136	10,0	267	267	358	357

Fonte: *Fuel Economy* (2021).

Nota: Produzido pelo autor. Dados numéricos arredondados.

7 CONCLUSÃO

O objetivo geral deste trabalho foi atingido, uma vez que dados de diferentes modelos de carros elétricos, referentes às tecnologias adotadas, foram organizados e apresentados em gráficos e tabelas comparativas, tornando possível uma conferência rápida e objetiva entre os diversos modelos avaliados.

Os objetivos específicos foram alcançados, já que foram apresentadas as possíveis configurações de um carro elétrico, e também identificadas as principais tendências de desenvolvimento para sistemas de tração elétrica e de energia. Também comparou-se dados de performance entre diferentes modelos de carros elétricos, a partir da organização prévia desses dados.

Diante do exposto, é possível concluir que os carros elétricos já são uma tecnologia suficientemente madura no quesito de performance veicular, conseguindo atingir marcas que somente carros com ICE de altíssimo desempenho alcançaram, como a marca de menos de 2,5 segundos de 0-100 km/h. Entretanto, algumas barreiras para a sua adoção em massa ainda existem em diversos países, como o Brasil, por exemplo, que possui uma infraestrutura de suporte aos carros elétricos muito aquém do necessário.

Carros elétricos já estão presentes em grandes quantidades em alguns países, como na Noruega, onde veículos elétricos (incluindo PHEV e BEV) representaram 74,8% do total de vendas de veículos no ano de 2020. Novas políticas de incentivo a tecnologias sustentáveis estão surgindo ao redor de todo o globo, que influenciam diretamente na adoção de carros elétricos.

Em adição às contribuições deste trabalho, destaca-se a possibilidade de, em trabalhos futuros, serem realizados estudos a respeito das políticas governamentais em ação para que o Brasil mude o cenário atual em relação aos carros elétricos, assim como avaliar os maiores problemas enfrentados por essa tecnologia no país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIB, A.; DHAOUADI, R. Performance Analysis of Regenerative Braking in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives. **Technology and Engineering Systems Journal**, Sharjah, v. 3, n. 1, p. 460-466, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.25046/aj030156>. Disponível em: https://www.astesj.com/publications/ASTESJ_030156.pdf. Acesso em: 30 mar. 2021.

ALL ABOUT CIRCUITS. **Introduction to Battery Management Systems**. 2021. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/introduction-to-battery-management-systems/>. Acesso em: 14 mar. 2021.

ALTERNATIVE FUELS DATA CENTER. **All-Electric Vehicles**. 2021. Disponível em: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_basics_ev.html. Acesso em: 25 fev. 2021.

BATTERIES INTERNATIONAL. **Tesla Announces it will Ditch the Auxiliary Lead Battery in Models S and X**. 2021. Disponível em: <https://www.batteriesinternational.com/2021/02/12/tesla-announces-it-will-ditch-the-auxiliary-lead-battery-in-models-s-and-x>. Acesso em: 30 mar. 2021.

BLOG DAS BATERIAS. **Conheça os quatro principais tipos de baterias de Lítio e suas aplicações**. 2013. Disponível em: <https://www.bbaterias.com.br/noticias/conheca-os-quatro-principais-tipos-de-baterias-de-litio-e-suas-aplicacoes>. Acesso em: 30 mar. 2021.

BLOOMBERG. **This Is the Dawning of the Age of the Battery**. 2020. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-12-17/this-is-the-dawning-of-the-age-of-the-battery?srnd=green>. Acesso em: 13 mar. 2021.

BURCH, I.; GILCHRIST, J.; HANCOCK A. (ed.); WAALAND, G. (ed.). **Survey of Global Activity to Phase Out Internal Combustion Engine Vehicles**. [S. l.]: The Climate Center, 2018. Disponível em: <https://theclimatecenter.org/wp-content/uploads/2020/03/Survey-on-Global-Activities-to-Phase-Out-ICE-Vehicles-update-3.18.20-1.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2021.

CASTRO, S. G; BARROS, B. H. R; VEIGA, D. C. Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 37, p. 443-496, mar. 2013. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1511>. Acesso em: 20 mar. 2021.

CESAR, J. Volvo fecha parceria para ampliar rede com 250 novas estações de recarga. **InsideEVs.com.br**, São Paulo, 12 fev. 2021, 13:58. Disponível em: <https://insideevs.uol.com.br/news/487483/volvo-enelx-parceria-rede-estacoes-recarga/>. Acesso em: 27 mar. 2021.

CHANG, C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. **Proceedings of the IEEE**, [s. l.], v. 90, n. 2, p. 247-275, fev. 2002. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/989873>. Acesso em: 06 maio 2021.

CLEANTECHNICA. **Tesla & Other EV Sales — Global & Country by Country**. 2020. Disponível em: <https://cleantechnica.com/tesla-sales/>. Acesso em: 10 fev. 2021.

ELECTROMAPS. **All about charging stations**. 2021. Disponível em: <https://www.electromaps.com/en>. Acesso em: 26 mar. 2021.

FLAKTGROUP. **Motors Basic. Part Two: Basic Principles - AC Induction Motors**. 2020. Disponível em: <https://www.flaktgroup.com/en/news/news-archive/2020/july/basic-principles-of-ac-induction-motors/>. Acesso em: 03 mar. 2021.

FREITAS, J. C. N. **Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Guimarães, 2012. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/22557/1/Tese_VF_a52762_Pdf.pdf. Acesso em: 22 fev. 2021.

FUEL ECONOMY. **Download Economy Data**. 2021. Disponível em: <https://www.fueleconomy.gov/feg/download.shtml>. Acesso em: 30 mar. 2021.

HENRIQUE, M. A. **Carros elétricos: viabilidade econômica e ambiental de inserção competitiva no mercado brasileiro**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/1579/6/MONOGRAFIA_CarrosEI%C3%A9tricosViabilidade.pdf. Acesso em: 03 mar. 2021.

HYPERPHYSICS. **Commutator and Brushes on DC Motor**. 2021. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/comtat.html>. Acesso em: 26 fev. 2021.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62196-1: Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements**. Geneva: IEC, 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2020: Entering the decade of electric drive?**. 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>. Acesso em: 11 fev. 2021.

KAMAPRI. **ANEL COLETOR - KAMAPRI**. 2021. Disponível em: <https://kamapri.com.br/produtos/anel-coletor/>. Acesso em: 26 fev. 2021.

KHALIGH, A.; LI, Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, [s.l.], v. 59, n. 6, p. 2806-2814, jul. 2010. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5446335>. Acesso em: 06 maio 2021.

LIBRARY OF CONGRESS. **Who invented the automobile?**. 2019. Disponível em: <https://www.loc.gov/rr/scitech/mysteries/auto.html>. Acesso em: 29 nov. 2019.

MATHWORKS. **Field-Oriented Control of Induction Motors with Simulink, Part 1: What Is Field-Oriented Control?**. 2021. Disponível em: <https://www.mathworks.com/videos/what-is-field-oriented-control-1538568554720.html>. Acesso em: 12 mar. 2021.

MAZDA. **Mazda Hydrogen Rotary Now Street Legal**. 2004. Disponível em: <http://www2.mazda.com/en/publicity/release/archive/2004/200410/1027e.html>. Acesso em: 15 nov. 2018.

MOTION CONTROL TIPS. **What is field weakening and how does it affect servo motor performance?**. 2021. Disponível em: <https://www.motioncontroltips.com/what-is-field-weakening-and-how-does-it-affect-servo-motor-performance/>. Acesso em: 07 mar. 2021.

MOUNTAINPASS PERFORMANCE. **Tesla Model 3 SR+ Dyno Testing**. 2019. Disponível em: <https://www.mountainpassperformance.com/tesla-model-3-sr-dyno-testing/>. Acesso em: 25 fev. 2021.

PARAG, J. C.; MEIKANDASIVAM S. A Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles. *In*: BAJPAI, R.; CHANDRASEKHAR, U. (ed.). **Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering**. Singapura: Springer Singapore, 2016. p. 211-229. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-10-1771-1_25. Acesso em: 27 fev. 2021.

PLUGSHARE. **EDP | Sede Ed. Maxxi**. 2016. Disponível em: <https://www.plugshare.com/location/169039>. Acesso em: 19 mar. 2021.

POPP, H.; ZHANG, N.; JAHN, M.; ARRINDA, M.; RITZ, S.; FABER, M.; SAUER, D. U.; AZAIS, P.; CENDOYA, I. Ante-mortem analysis, electrical, thermal, and ageing testing of state-of-the-art cylindrical lithium-ion cells. **e & i Elektrotechnik und Informationstechnik**, Graz, v. 137, p. 169–176, 16 jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00502-020-00814-9>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00502-020-00814-9>. Acesso em: 19 mar. 2021.

RAJASHEKARA, K. Present Status and Future Trends in Electric Vehicle Propulsion Technologies. **IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 3-10, mar. 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6507304>. Acesso em: 06 maio 2021.

ROPER, L. D. **Tesla Model S**. 2016. Disponível em: <http://www.roperld.com/science/TeslaModelS.htm>. Acesso em: 14 mar. 2021.

ROSOLEM, M. F.; BECK, R. F.; SANTOS, G. R.; ARIOLI, V. T. Bateria de lítio-íon: conceitos básicos e potencialidades. **Caderno CPqD Tecnologia**, Campinas, v. 8, n. 2, p. 59-72, jul./dez. 2012. Disponível em: <https://sil0.tips/download/bateria-de-litio-ion-conceitos-basicos-e-potencialidades>. Acesso em: 13 mar. 2021.

SACHS, J. Pulse Width Modulation (PWM). **Microchip Technology Inc**, Arizona, 2021. Disponível em: <https://microchipdeveloper.com/mct5001:pwm>. Acesso em: 07 mar. 2021.

SCHRODER, R.; AYDEMIR, M.; SELIGER, G. Comparatively assessing different shapes of lithium-ion battery cells. **Procedia Manufacturing**, Berlin, v. 8, p. 104-111, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917300173>. Acesso em: 19 mar. 2021.

STA-ELETRONICA. **Como funcionam as baterias**. 2021. Disponível em: <https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-em-geral/informacoes-basicas/como-funcionam-as-baterias>. Acesso em: 13 mar. 2021.

STATISTA. **Number of passenger cars and commercial vehicles in use worldwide from 2006 to 2015**. 2017. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/281134/number-of-vehicles-in-use-worldwide/>. Acesso em: 15 nov. 2018.

TANG, Z.; MIN, X.; SONG, A.; CHENG, J. Thermal Management of a Cylindrical Lithium-Ion Battery Module Using a Multichannel Wavy Tube. **Journal of Energy Engineering**, [s.l.], v. 145, n. 1, p. 04018072, 2019. ISSN 0733-9402. DOI 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000592. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29EY.1943-7897.0000592>. Acesso em: 06 maio 2021.

TESLA. **Model 3**. 2021a. Disponível em: <https://www.tesla.com/model3>. Acesso em: 10 fev. 2021.

TESLA. **Model S Long Range Plus: Building the First 400-Mile Electric Vehicle**. 2020. Disponível em: <https://www.tesla.com/blog/model-s-long-range-plus-building-first-400-mile-electric-vehicle>. Acesso em: 20 fev. 2021.

TESLA. **Model S**. 2021b. Disponível em: <https://www.tesla.com/models>. Acesso em: 30 mar. 2021.

THE DRIVEN. **Why is Tesla charging different?**. 2018. Disponível em: <https://thedriven.io/2018/10/10/tesla/>. Acesso em: 02 abr. 2021.

THE WORLD BANK GROUP. **CO₂ emissions from transport (% of total fuel combustion) - Brazil**. 2014a. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.CO2.TRAN.ZS?end=2014&locations=BR&start=1960&view=chart>. Acesso em: 30 mar. 2021.

THE WORLD BANK GROUP. **CO₂ emissions from transport (% of total fuel combustion)**. 2014b. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.CO2.TRAN.ZS?end=2014&start=1960&view=chart>. Acesso em: 15 nov. 2018.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Electric-Drive Vehicles**. 2017. Disponível em: https://afdc.energy.gov/files/u/publication/electric_vehicles.pdf. Acesso em: 15 fev. 2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **EPA Federal Test Procedure (FTP)**. 2021a. Disponível em: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-federal-test-procedure-ftp>. Acesso em: 02 mar. 2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Smog, Soot, and Other Air Pollution from Transportation**. 2021b. Disponível em: <https://www.epa.gov/transportation-air-pollution-and-climate-change/smog-soot-and-local-air-pollution>. Acesso em: 15 fev. 2021.

UN-NOOR, F.; PADMANABAN, S.; MIHET-POPA L.; MOLLAH, M. N.; HOSSAIN, E.; SAPONARA, S. (ed.). A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development. **Energies**, [s.l.], v. 10, n. 8, p. 1217, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/en10081217>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/8/1217>. Acesso em: 25 fev. 2021.

VILLAR, G. J. V. **Geradores e Motores CC** (Máquinas de Corrente Contínua). Mossoró: Centro Federal de Educação Tecnológica do RN, 2006. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/apostila-de-maquinas-de-cc-1>. Acesso em: 25 fev. 2021.

WEG. **Guia de aplicação de inversores de frequência**. 3. ed. Jaraguá do Sul: WEG, 2005. Disponível em: http://paginapessoal.utfpr.edu.br/waltersanchez/MATERIAL%20WEG/Guia%20de%20Aplicacao%20e%20Inversores%20de%20Frequencia%20WEG%203%20Edicao.pdf/at_download/file. Acesso em: 30 mar. 2021.

WEG. **Guia de Especificação Motores Elétricos**. Jaraguá do Sul: WEG, 2021. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2021.

WEG. **Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência WEG**. Jaraguá do Sul: Departamento de P&D WEG, 2007. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hce/h39/WEG-motor-de-imas-permanentes-e-inversor-de-frequencia-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2021.

APÊNDICE A – BASE DE DADOS FILTRADOS

Informações do Carro Elétrico		Eficiência em Wh/km			Informações da Bateria			TREM DE FORÇA	Informações do Motor/Gerador			Autonomia em km		
Ano	Fabricante e Modelo	Cidade E	Estrada E	Comb E	Cap Total (kWh)	EE por massa(Wh/kg)	240V Carg (h)	Eixo de Tração	N de ME M1	M2	Pot Max (kW)	Cidade A	Estrada A	Comb A
2011	BMW 1 Series Active E	198,84	217,48	205,053	28,4	103		5 TRASEIRO	1 MI		125	158,69	143,90	151,28
2011	Smart Fortwo Electric Drive Coupe	242,34	285,83	267,190	18,468	113,2		8 TRASEIRO	1 PMSM		30	110,45	90,44	101,39
2011	Smart Fortwo Electric Drive Cabriolet	242,34	285,83	267,190	18,468	113,2		8 TRASEIRO	1 PMSM		30	110,45	90,44	101,39
2012	Tesla Model S	236,12	229,91	236,122	82,95	170		12 TRASEIRO	1 MI		260	422,76	429,34	426,48
2012	Nissan Leaf	198,84	229,91	211,267	23,76	82,8		7 DIANTEIRO	1 PMSM		80	124,18	108,33	117,48
2012	Coda	273,40	310,69	285,831	31,968	78,5		6 DIANTEIRO	1 PMSM		100	150,56	130,84	141,62
2012	Mitsubishi i-MiEV	167,77	211,27	186,412	16,5	67		7 TRASEIRO	1 PMSM		49	110,33	88,22	99,78
2012	Toyota RAV4 EV	267,19	285,83	273,404	50,18	110,3		6 DIANTEIRO	1 MI		115	172,20	159,16	165,76
2012	Azure Transit Connect Electric Van/Wagon	341,76	335,54	335,541	26,565	93,6		8 DIANTEIRO	1 MI		52	91,38	89,60	90,12
2013	Coda	273,40	310,69	285,831	31,968	78,5		6 DIANTEIRO	1 PMSM		100	150,56	130,84	141,62
2013	Fiat 500e	173,98	192,63	180,198	22,932	88		4 DIANTEIRO	1 IPMSM		82	147,80	131,13	140,01
2013	Ford Focus FWD BEV	192,63	211,27	198,839	26,25	80,2		4 DIANTEIRO	1 PMSM		107	128,36	115,11	122,31
2013	Honda Fit EV	161,56	198,84	180,198	6,6	89,3		4 DIANTEIRO	1 PMSM		92	144,53	118,38	131,97
2013	Mercedes Smart Fortwo Electric Drive Convertible	173,98	223,69	198,839	17,628	98,9		6 TRASEIRO	1 PMSM		55	122,00	95,10	109,44
2013	Mercedes Smart Fortwo Electric Drive Coupe	173,98	223,69	198,839	17,628	98,9		6 TRASEIRO	1 PMSM		55	122,00	95,10	109,44
2013	Mitsubishi i-MiEV	167,77	211,27	186,412	16,5	67		7 TRASEIRO	1 PMSM		49	110,33	88,22	99,78
2013	Nissan Leaf	161,56	205,05	180,198	23,76	87,9		4 DIANTEIRO	1 PMSM		80	131,97	105,57	120,70
2013	Tesla Model S (85 kW-hr battery pack)	236,12	229,91	236,122	98	170		12 TRASEIRO	1 MI		270	422,77	429,37	426,48
2013	Tesla Model S (60 kW-hr battery pack)	223,69	217,48	217,480	98	170		10 TRASEIRO	1 MI		225	331,04	339,09	334,74
2013	Tesla Model S (40 kW-hr battery pack)	223,69	217,48	223,694	98	170		6 TRASEIRO	1 MI		225	222,89	226,43	223,70
2014	BMW i3 BEV	155,34	186,41	167,771	21,6	93		4 TRASEIRO	1 MI		125	143,23	115,23	130,36
2014	BYD e6	341,76	323,11	335,541	61,4	94,8		6 DIANTEIRO	1 PMSM		75	194,89	215,49	204,39
2014	Chevrolet Spark EV	161,56	192,63	173,984	22,2	83		7 DIANTEIRO	1 PMSM		104	141,30	120,38	131,97
2014	Fiat 500e	173,98	192,63	180,198	25,137	88		4 DIANTEIRO	1 MI		82	147,80	131,13	140,01
2014	Ford Focus Electric FWD	192,63	211,27	198,839	26,25	80,2		3,6 DIANTEIRO	1 PMSM		107	128,36	115,11	122,31
2014	Honda Fit EV	161,56	198,84	180,198	6,6	89,3		4 DIANTEIRO	1 PMSM		92	144,53	118,38	131,97
2014	Mercedes B-Class Electric Drive	248,55	254,76	248,549	44,04	125,9		3,5 DIANTEIRO	1 MI		132	142,43	138,73	140,01
2014	Mercedes Smart Fortwo Electric Drive Convertible	173,98	223,69	198,839	17,628	98,9		6 TRASEIRO	1 PMSM		55	122,31	94,95	109,44
2014	Mercedes Smart Fortwo Electric Drive Coupe	173,98	223,69	198,839	17,628	98,9		6 TRASEIRO	1 PMSM		55	122,31	94,95	109,44
2014	Mitsubishi i-MiEV	167,77	211,27	186,412	16,5	67		7 TRASEIRO	1 PMSM		49	110,32	88,22	99,78
2014	Nissan Leaf	167,77	205,05	186,412	23,76	87,3		5 DIANTEIRO	1 PMSM		80	148,06	119,09	135,18
2014	Tesla Model S (85 kW-hr battery pack)	236,12	229,91	236,122	98	170		12 TRASEIRO	1 MI		270	422,77	429,37	426,48
2014	Tesla Model S (60 kW-hr battery pack)	223,69	217,48	217,480	98	170		10 TRASEIRO	1 MI		225	331,04	339,09	334,74

Informações do Carro Elétrico		Eficiência em Wh/km			Informações da Bateria			TREM DE FORÇA	Informações do Motor/Gerador			Autonomia em km			
Ano	Fabricante e Modelo	Cidade E	Estrada E	Comb E	Cap Total (kWh)	EE por massa(Wh/kg)	240V Carg (h)	Eixo de Tração	N de ME M1	M2	Pot Max (kW)	Cidade A	Estrada A	Comb A	
2014	Tesla Model S AWD (85 kW-hr battery pack)	242,34	223,69	236,122	98	170	12	TODOS	2	MI	MI	530	375,78	407,48	389,46
2015	BMW I3 BEV	155,34	186,41	167,771	21,6	93	4	TRASEIRO	1	MI		125	143,23	115,23	130,36
2015	Chevrolet Spark EV	161,56	192,63	173,984	22,2	83	7	DIANTEIRO	1	PMSM		104	141,30	120,38	131,97
2015	Fiat 500e	173,98	192,63	180,198	25,137	88	4	DIANTEIRO	1	MI		82	147,80	131,13	140,01
2015	Ford Focus Electric FWD	192,63	211,27	198,839	26,25	80,2	3,6	DIANTEIRO	1	PMSM		107	128,36	115,11	122,31
2015	Kia Soul Electric	173,98	229,91	198,839	27	98,4	4	DIANTEIRO	1	IPMSM		81	166,73	128,26	149,67
2015	Mercedes B-Class Electric Drive	242,34	254,76	248,549	44,04	125,9	3,5	DIANTEIRO	1	MI		132	143,23	136,79	140,01
2015	Mercedes Smart Fortwo Electric Drive Convertible	173,98	223,69	198,839	17,628	98,9	6	TRASEIRO	1	PMSM		55	122,31	94,95	109,44
2015	Mercedes Smart Fortwo Electric Drive Coupe	173,98	223,69	198,839	17,628	98,9	6	TRASEIRO	1	PMSM		55	122,31	94,95	109,44
2015	Nissan Leaf	167,77	205,05	186,412	23,76	87,9	5	DIANTEIRO	1	PMSM		80	148,06	119,09	135,18
2015	Tesla Model S (60 kW-hr battery pack)	223,69	217,48	217,480	98	170	10	TRASEIRO	1	MI		225	331,04	339,09	334,74
2015	Tesla Model S (85 kW battery pack)	236,12	229,91	236,122	98	170	12	TRASEIRO	1	MI		270	422,77	429,37	426,48
2015	Tesla Model S (90 kW-hr battery pack)	236,12	229,91	236,122	98	170	12	TRASEIRO	1	MI		285	422,77	429,37	426,48
2015	Tesla Model S AWD – 70D	205,05	205,05	205,053	98	170	12	TODOS	2	MI	MI	280	390,75	396,54	386,24
2015	Tesla Model S AWD – 85D	217,48	198,84	211,267	98	170	12	TODOS	2	MI	MI	280	413,76	459,14	434,52
2015	Tesla Model S AWD – 90D	217,48	198,84	211,267	98	170	12	TODOS	2	MI	MI	280	413,76	459,14	434,52
2015	Tesla Model S AWD – P85D	236,12	217,48	223,694	98	170	12	TODOS	2	MI	MI	514	389,94	427,28	407,16
2015	Tesla Model S AWD – P90D	236,12	217,48	223,694	98	170	12	TODOS	2	MI	MI	514	389,94	427,28	407,16
2015	Volkswagen e-Golf	167,77	198,84	180,198	27,075	76,2	4	DIANTEIRO	1	PMSM		85	143,07	121,02	133,58
2016	BMW I3 BEV	155,34	186,41	167,771	21,6	93	4	TRASEIRO	1	MI		125	143,23	115,23	130,36
2016	BYD e6	285,83	292,05	292,045	82,08	138,1	5	DIANTEIRO	1	PMSM		75	303,68	296,60	300,95
2016	Chevrolet Spark EV	161,56	192,63	173,984	19,24	85	7	DIANTEIRO	1	PMSM		105	141,30	120,38	131,97
2016	Fiat 500e	173,98	205,05	186,412	25,137	88	4	DIANTEIRO	1	MI		82	144,87	123,36	135,18
2016	Ford Focus Electric FWD	192,63	211,27	198,839	26,25	80,2	3,6	DIANTEIRO	1	PMSM		107	128,36	115,11	122,31
2016	Kia Soul Electric	173,98	229,91	198,839	27	98,4	4	DIANTEIRO	1	IPMSM		81	166,73	128,26	149,67
2016	Mercedes B250e	242,34	254,76	248,549	44,04	125,9	3,5	DIANTEIRO	1	MI		132	143,23	136,79	140,01
2016	Mercedes Smart Fortwo Electric Drive Convertible	173,98	223,69	198,839	17,628	98,9	6	TRASEIRO	1	PMSM		55	122,31	94,95	109,44
2016	Mercedes Smart Fortwo Electric Drive Coupe	173,98	223,69	198,839	17,628	98,9	6	TRASEIRO	1	PMSM		55	122,31	94,95	109,44
2016	Mitsubishi i-MiEV	167,77	211,27	186,412	16,5	110	7	TRASEIRO	1	PMSM		49	110,33	88,22	99,78
2016	Nissan Leaf (24 kW-hr battery pack)	167,77	205,05	186,412	23,76	87,3	5	DIANTEIRO	1	PMSM		80	148,06	119,09	135,18
2016	Nissan Leaf (30 kW-hr battery pack)	167,77	205,05	186,412	29,88	102	6	DIANTEIRO	1	PMSM		80	186,68	152,89	172,20
2016	Tesla Model S (60 kW-hr battery pack)	217,48	205,05	211,267	98	170	10	TRASEIRO	1	MI		285	333,94	345,69	337,96
2016	Tesla Model S (70 kW-hr battery pack)	236,12	229,91	236,122	98	170	10	TRASEIRO	1	MI		285	376,59	377,07	376,59

Informações do Carro Elétrico		Eficiência em Wh/km			Informações da Bateria			TREM DE FORÇA	Informações do Motor/Gerador			Autonomia em km		
Ano	Fabricante e Modelo	Cidade E	Estrada E	Comb E	Cap Total (kWh)	EE por massa(Wh/kg)	240V Carg (h)	Eixo de Tração	N de ME M1	M2	Pot Max (kW)	Cidade A	Estrada A	Comb A
2016	Tesla Model S (75 kW-hr battery pack)	217,48	211,27	211,267	98	170	10	TRASEIRO	1	MI	285	396,06	406,68	400,73
2016	Tesla Model S (85 kW-hr battery pack)	236,12	229,91	236,122	98	170	12	TRASEIRO	1	MI	285	422,77	429,37	426,48
2016	Tesla Model S (90 kW-hr battery pack)	236,12	229,91	236,122	98	170	12	TRASEIRO	1	MI	285	422,77	429,37	426,48
2016	Tesla Model S AWD – 60D	205,05	198,84	198,839	98	170	12	TODOS	2	MI	386	355,83	365,16	350,84
2016	Tesla Model S AWD – 70D	205,05	205,05	205,053	98	170	12	TODOS	2	MI	386	390,75	396,54	386,24
2016	Tesla Model S AWD – 75D	205,05	198,84	205,053	98	170	12	TODOS	2	MI	386	410,38	425,83	416,82
2016	Tesla Model S AWD – 85D	217,48	198,84	211,267	98	170	12	TODOS	2	MI	386	413,76	459,14	434,52
2016	Tesla Model S AWD – 90D	205,05	198,84	205,053	98	170	12	TODOS	2	MI	386	459,79	487,95	473,15
2016	Tesla Model S AWD – P85D	236,12	217,48	223,694	98	170	12	TODOS	2	MI	568	389,94	427,28	407,16
2016	Tesla Model S AWD – P90D	229,91	211,27	217,480	98	170	12	TODOS	2	MI	568	417,78	456,09	434,52
2016	Tesla Model S AWD – P100D	223,69	198,84	217,480	98	170	12	TODOS	2	MI	568	492,30	558,28	506,94
2016	Tesla Model X AWD – 60D	229,91	223,69	223,694	87,5	150	12	TODOS	2	MI	386	316,24	327,02	321,87
2016	Tesla Model X AWD – 75D	229,91	217,48	223,694	87,5	150	12	TODOS	2	MI	386	376,10	389,78	383,02
2016	Tesla Model X AWD – 90D	229,91	223,69	229,908	87,5	150	12	TODOS	2	MI	386	406,20	422,77	413,60
2016	Tesla Model X AWD – P90D	236,12	229,91	236,122	87,5	150	12	TODOS	2	MI	568	397,99	406,68	402,34
2016	Tesla Model X AWD – P100D	254,76	229,91	242,335	87,5	150	12	TODOS	2	MI	568	444,34	492,14	465,10
2016	Volkswagen e-Golf	167,77	198,84	180,198	27,225	76,1	7	DIANTEIRO	1	PMSM	85	143,07	121,02	133,58
2017	BMW I3 BEV (60 Amp-hour battery)	155,34	186,41	167,771	21,6	93	4	TRASEIRO	1	MI	125	143,23	115,23	130,36
2017	BMW I3 BEV (94 Amp-hour battery)	161,56	198,84	180,198	33,84	132	5	TRASEIRO	1	MI	125	199,24	163,99	183,46
2017	BYD e6	285,83	292,05	292,045	82,08	138,1	5	DIANTEIRO	1	PMSM	75	303,68	296,60	300,95
2017	Chevrolet Bolt EV	161,56	192,63	173,984	59,99	140	9,3	DIANTEIRO	1	PMSM	150	410,54	349,87	383,02
2017	Fiat 500e	173,98	205,05	186,412	25,137	88	4	DIANTEIRO	1	MI	82	144,87	123,36	135,18
2017	Ford Focus Electric FWD	173,98	217,48	192,626	38,22	110	5,5	DIANTEIRO	1	PMSM	107	202,45	163,67	185,07
2017	Honda Clarity (Battery Electric Vehicle)	167,77	205,05	186,412	25,4709	141	4	DIANTEIRO	1	PMSM	120	155,62	126,98	143,23
2017	Hyundai Ioniq Electric	136,70	173,98	155,343	28,08	103,7	4	DIANTEIRO	1	IPMSM	88	217,90	177,03	199,56
2017	Kia Soul Electric	173,98	229,91	198,839	27	98,4	4	DIANTEIRO	1	IPMSM	81	166,73	128,26	149,67
2017	Mercedes B250e	242,34	254,76	248,549	44,04	125,9	3,5	DIANTEIRO	1	MI	132	143,23	136,79	140,01
2017	Mercedes Smart Fortwo Electric Drive Coupe	167,77	223,69	192,626	17,2212	101	3	TRASEIRO	1	PMSM	60	101,39	82,08	93,34
2017	Mercedes Smart Fortwo Electric Drive Convertible	186,41	229,91	205,053	17,2212	101	3	TRASEIRO	1	PMSM	60	99,78	80,47	91,73
2017	Mitsubishi i-MiEV	173,98	205,05	186,412	16,5	110	7	TRASEIRO	1	PMSM	49	102,84	86,90	94,95
2017	Nissan Leaf	167,77	205,05	186,412	29,88	102	6	DIANTEIRO	1	PMSM	80	186,68	152,89	172,20
2017	Tesla Model 3 Long Range	161,56	173,98	167,771	80,5	150	12	TRASEIRO	1	PMSM	192	518,05	475,56	498,90
2017	Tesla Model S (60 kW-hr battery pack)	217,48	205,05	211,267	98	170	10	TRASEIRO	1	MI	285	332,65	344,40	337,96

Informações do Carro Elétrico		Eficiência em Wh/km			Informações da Bateria			TREM DE FORÇA	Informações do Motor/Gerador			Autonomia em km		
Ano	Fabricante e Modelo	Cidade E	Estrada E	Comb E	Cap Total (kWh)	EE por massa(Wh/kg)	240V Carg (h)	Eixo de Tração	N de ME M1	M2	Pot Max (kW)	Cidade A	Estrada A	Comb A
2017	Tesla Model S (75 kW-hr battery pack)	217,48	211,27	211,267	98	170	10	TRASEIRO	1	MI	285	396,06	406,68	400,73
2017	Tesla Model S AWD – 60D	205,05	198,84	198,839	98	170	12	TODOS	2	MI	386	346,65	355,83	350,84
2017	Tesla Model S AWD – 75D	205,05	198,84	205,053	98	170	12	TODOS	2	MI	386	410,38	425,83	416,82
2017	Tesla Model S AWD – 90D	205,05	198,84	198,839	98	170	12	TODOS	2	MI	386	461,56	487,15	473,15
2017	Tesla Model S AWD – P90D	229,91	211,27	217,480	98	170	12	TODOS	2	MI	568	417,46	455,28	434,52
2017	Tesla Model S AWD – 100D	205,05	205,05	205,053	98	170	12	TODOS	2	MI	386	536,07	542,67	539,13
2017	Tesla Model S AWD – P100D	223,69	198,84	217,480	98	170	12	TODOS	2	MI	568	478,13	542,19	506,94
2017	Tesla Model X AWD – 60D	229,91	223,69	223,694	87,5	150	12	TODOS	2	MI	386	316,24	327,02	321,87
2017	Tesla Model X AWD – 75D	229,91	217,48	223,694	87,5	150	12	TODOS	2	MI	386	376,10	389,78	383,02
2017	Tesla Model X AWD – 90D	229,91	223,69	229,908	87,5	150	12	TODOS	2	MI	386	406,20	422,77	413,60
2017	Tesla Model X AWD – P90D	236,12	229,91	236,122	87,5	150	12	TODOS	2	MI	568	397,99	406,68	402,34
2017	Tesla Model X AWD – 100D	242,34	236,12	242,335	87,5	150	12	TODOS	2	MI	386	468,80	482,00	474,76
2017	Tesla Model X AWD – P100D	254,76	229,91	242,335	87,5	150	12	TODOS	2	MI	568	444,34	492,14	465,10
2017	Volkswagen e-Golf	167,77	186,41	173,984	41,07	104,1	5,3	DIANTEIRO	1	PMSM	100	209,70	189,42	201,17
2018	BMW I3 BEV (94 Amp-hour battery)	161,56	198,84	180,198	33,84	132	5	TRASEIRO	1	MI	125	199,24	163,99	183,46
2018	BMW I3S BEV (94 Amp-hour battery)	167,77	211,27	186,412	33,84	132	5	TRASEIRO	1	MI	125	190,22	150,15	172,20
2018	BYD e6	285,83	292,05	292,045	82,08	138,1	5	DIANTEIRO	1	PMSM	75	303,68	296,60	300,95
2018	Chevrolet Bolt EV	161,56	192,63	173,984	59,99	140	9,3	DIANTEIRO	1	PMSM	150	410,54	349,87	383,02
2018	Fiat 500e	173,98	205,05	186,412	25,137	88	4	DIANTEIRO	1	MI	82	144,84	123,28	135,18
2018	Ford Focus Electric FWD	173,98	217,48	192,626	38,22	110	5,5	DIANTEIRO	1	PMSM	107	202,45	163,67	185,07
2018	Honda Clarity (Battery Electric Vehicle)	167,77	205,05	186,412	25,4709	141	4	DIANTEIRO	1	PMSM	120	155,62	126,98	143,23
2018	Hyundai Ioniq Electric	136,70	173,98	155,343	28,08	103,7	4	DIANTEIRO	1	IPMSM	88	217,90	177,03	199,56
2018	Kia Soul Electric	167,77	223,69	192,626	28,8	104,3	5	DIANTEIRO	1	IPMSM	81	201,33	152,24	178,64
2018	Mercedes Smart Fortwo Electric Drive Coupe	167,77	223,69	192,626	17,2212	101	3	TRASEIRO	1	PMSM	60	101,39	82,08	93,34
2018	Mercedes Smart Fortwo Electric Drive Convertible	186,41	229,91	205,053	17,2212	101	3	TRASEIRO	1	PMSM	60	99,78	80,47	91,73
2018	Nissan Leaf	167,77	211,27	186,412	40,25	132	8	DIANTEIRO	1	PMSM	110	267,15	213,72	243,01
2018	Tesla Model 3 Mid Range (RWD)	161,56	180,20	167,771	80,5	150	10	TRASEIRO	1	PMSM	202	434,68	398,47	418,43
2018	Tesla Model 3 Long Range (RWD)	155,34	167,77	161,557	80,5	150	10	TRASEIRO	1	PMSM	202	521,59	471,21	498,90
2018	Tesla Model 3 Long Range AWD	173,98	186,41	180,198	80,5	150	10	TODOS	2	MI	335	515,31	478,30	498,90
2018	Tesla Model 3 Long Range AWD Performance	173,98	186,41	180,198	80,5	150	10	TODOS	2	MI	349	515,31	478,30	498,90
2018	Tesla Model S (75 kW-hr battery pack)	217,48	211,27	211,267	98	170	10	TRASEIRO	1	MI	270	396,06	406,68	400,73
2018	Tesla Model S AWD – 75D	205,05	198,84	205,053	98	170	12	TODOS	2	MI	386	410,38	425,83	416,82
2018	Tesla Model S AWD – 100D	205,05	205,05	205,053	98	170	12	TODOS	2	MI	386	536,07	542,67	539,13

Informações do Carro Elétrico		Eficiência em Wh/km			Informações da Bateria			TREM DE FORÇA	Informações do Motor/Gerador			Autonomia em km			
Ano	Fabricante e Modelo	Cidade E	Estrada E	Comb E	Cap Total (kWh)	EE por massa(Wh/kg)	240V Carg (h)	Eixo de Tração	N de ME M1	M2	Pot Max (kW)	Cidade A	Estrada A	Comb A	
2018	Tesla Model S AWD – P100D	223,69	198,84	217,480	98	170	12	TODOS	2	MI	MI	568	478,13	542,19	506,94
2018	Tesla Model X AWD – 75D	229,91	217,48	223,694	87,5	150	12	TODOS	2	MI	MI	386	376,10	389,78	383,02
2018	Tesla Model X AWD – 100D	242,34	236,12	242,335	87,5	150	12	TODOS	2	MI	MI	386	468,80	482,00	474,76
2018	Tesla Model X AWD – P100D	254,76	236,12	248,549	87,5	150	12	TODOS	2	MI	MI	568	450,45	483,12	465,10
2018	Volkswagen e-Golf	167,77	186,41	173,984	41,07	104,1	5,3	DIANTEIRO	1	PMSM		100	209,70	189,42	201,17
2019	Audi e-tron	279,62	285,83	285,831	95,28	135,9	10	TODOS	2	MI	MI	314	330,56	326,54	328,31
2019	BMW I3 BEV (120 Amp-hour battery)	167,77	205,05	186,412	42,24	153	5	TRASEIRO	1	MI		125	267,96	219,51	246,23
2019	BMW I3s BEV (120 Amp-hour battery)	167,77	205,05	186,412	42,24	153	5	TRASEIRO	1	MI		135	267,96	219,51	246,23
2019	Chevrolet Bolt EV	161,56	192,63	173,984	59,99	140	9,3	DIANTEIRO	1	PMSM		150	410,54	349,87	383,02
2019	Fiat 500e	173,98	205,05	186,412	25,137	88	4	DIANTEIRO	1	MI		82	144,84	123,28	135,18
2019	Honda Clarity (Battery Electric Vehicle)	167,77	205,05	186,412	25,4709	141	4	DIANTEIRO	1	PMSM		120	155,62	126,98	143,23
2019	Hyundai Ioniq Electric	136,70	173,98	155,343	28,08	103,7	4	DIANTEIRO	1	IPMSM		88	218,07	177,03	199,56
2019	Hyundai Kona Electric	161,56	192,63	173,984	64,08	141,3	9	DIANTEIRO	1	IPMSM		150	457,21	363,71	415,21
2019	Jaguar I-Pace (BEV)	260,98	292,05	273,404	86,4852	143,4	13	TODOS	2	PMSM	PMSM	147	393,97	355,34	376,59
2019	Kia Niro Electric	167,77	205,05	186,412	64,08	140,4	9,5	DIANTEIRO	1	IPMSM		150	416,82	343,76	384,63
2019	Kia Soul Electric	167,77	223,69	192,626	28,8	104,3	5	DIANTEIRO	1	IPMSM		81	201,33	152,24	178,64
2019	Mercedes Smart EQ Fortwo Electric Drive Coupe	167,77	223,69	192,626	17,2212	101	3	TRASEIRO	1	PMSM		60	101,39	82,08	93,34
2019	Mercedes Smart EQ Fortwo Electric Drive Convertibl	186,41	229,91	205,053	17,2212	101	3	TRASEIRO	1	PMSM		60	99,78	80,47	91,73
2019	Nissan Leaf (40 kW-hr battery pack)	167,77	211,27	186,412	40,25	132	8	DIANTEIRO	1	PMSM		110	265,86	213,08	241,40
2019	Nissan Leaf (62 kW-hr battery pack)	180,20	217,48	192,626	61,6	140,9	11	DIANTEIRO	1	PMSM		160	394,29	325,41	363,71
2019	Nissan Leaf SV/SL (62 kW-hr battery pack)	180,20	223,69	198,839	61,6	140,9	11	DIANTEIRO	1	PMSM		160	376,10	309,80	346,01
2019	Tesla Model 3 Standard Range (RWD)	149,13	167,77	161,557	80,5	150	8,5	TRASEIRO	1	PMSM		211	370,95	332,01	354,05
2019	Tesla Model 3 Standard Range Plus (RWD)	149,13	167,77	155,343	80,5	150	9,5	TRASEIRO	1	PMSM		211	407,16	360,65	386,24
2019	Tesla Model 3 Mid Range (RWD)	161,56	180,20	167,771	80,5	150	10	TRASEIRO	1	PMSM		211	441,12	404,27	424,87
2019	Tesla Model 3 Long Range (RWD)	155,34	167,77	161,557	80,5	150	10	TRASEIRO	1	PMSM		211	546,85	494,07	523,04
2019	Tesla Model 3 Long Range AWD	173,98	186,41	180,198	80,5	150	10	TODOS	2	MI	PMSM	335	515,31	478,30	498,90
2019	Tesla Model 3 Long Range AWD Performance	173,98	186,41	180,198	80,5	150	10	TODOS	2	MI	PMSM	358	515,31	478,30	498,90
2019	Tesla Model S AWD – 75D	205,05	198,84	205,053	98	170	12	TODOS	2	MI	MI	386	410,38	425,83	416,82
2019	Tesla Model S AWD – 100D	205,05	205,05	205,053	98	170	12	TODOS	2	MI	MI	386	536,07	542,67	539,13
2019	Tesla Model S AWD – P100D	223,69	198,84	217,480	98	170	12	TODOS	2	MI	MI	568	478,13	542,19	506,94
2019	Tesla Model S AWD Standard Range	186,41	198,84	192,626	98	170	9,2	TODOS	2	MI	PMSM	398	475,40	439,19	458,66
2019	Tesla Model S AWD Long Range	180,20	192,63	186,412	98	170	12	TODOS	2	MI	PMSM	398	613,96	572,76	595,46
2019	Model S Performance (19" Wheels)	198,84	205,05	198,839	98	170	12	TODOS	2	MI	PMSM	398	556,83	553,29	555,22

Informações do Carro Elétrico		Eficiência em Wh/km			Informações da Bateria			TREM DE FORÇA	Informações do Motor/Gerador			Autonomia em km			
Ano	Fabricante e Modelo	Cidade E	Estrada E	Comb E	Cap Total (kWh)	EE por massa(Wh/kg)	240V Carg (h)	Eixo de Tração	N de ME M1	M2	Pot Max (kW)	Cidade A	Estrada A	Comb A	
2019	Model S Performance (21" Wheels)	211,27	217,48	217,480	98	170	12	TODOS	2	MI	PMSM	398	528,83	516,12	523,04
2019	Tesla Model X AWD – 75D	229,91	217,48	223,694	87,5	150	12	TODOS	2	MI	MI	386	376,10	389,78	383,02
2019	Tesla Model X AWD – 100D	242,34	236,12	242,335	87,5	150	12	TODOS	2	MI	PMSM	386	468,80	482,00	474,76
2019	Tesla Model X AWD – P100D	254,76	236,12	248,549	87,5	150	12	TODOS	2	MI	MI	568	450,45	483,12	465,10
2019	Tesla Model X Long Range	211,27	223,69	217,480	87,5	150	12	TODOS	2	MI	PMSM	569	536,23	506,78	523,04
2019	Tesla Model X Performance (22" Wheels)	260,98	273,40	267,190	87,5	150	12	TODOS	2	MI	PMSM	581	441,44	425,19	434,52
2019	Volkswagen e-Golf	167,77	186,41	173,984	41,07	104,1	5,3	DIANTEIRO	1	PMSM		100	210,18	189,74	201,17
2020	Audi e-tron Sportback	273,40	267,19	273,404	95,28	135,9	10	TODOS	2	MI	MI	313	347,46	356,47	350,84
2020	BMW I3 BEV (120 Ah battery)	167,77	205,05	186,412	42,24	153	7	TRASEIRO	1	PMSM		125	267,96	219,51	246,23
2020	BYD e6	167,77	205,05	186,412	42,24	153	7	TRASEIRO	1	PMSM		135	267,96	219,51	246,23
2020	BYD e6	285,83	292,05	292,045	82,08	138,1	5	DIANTEIRO	1	PMSM		75	303,68	296,60	300,95
2020	Chevy Bolt (BEV)	161,56	192,63	180,198	75,4	153,5	10	DIANTEIRO	1	PMSM		150	446,91	378,36	416,82
2020	Hyundai Ioniq Electric	142,92	173,98	155,343	38,28	112,4	5,8	DIANTEIRO	1	IPMSM		100	295,80	246,71	273,59
2020	Hundai Kona EV	155,34	192,63	167,771	64,08	141,3	9	DIANTEIRO	1	IPMSM		150	457,21	363,71	415,21
2020	Jaguar I-Pace (BEV)	260,98	292,05	273,404	86,4852	143,4	13	TODOS	2	PMSM	PMSM	147	393,97	355,66	376,59
2020	Kia Niro Electric	167,77	205,05	186,412	64,08	140,4	9,5	DIANTEIRO	1	IPMSM		150	416,82	343,76	384,63
2020	Kia Soul Electric	167,77	205,05	186,412	64,08	140,4	9,5	DIANTEIRO	1	IPMSM		201	432,43	339,73	391,07
2020	Mini Cooper SE Hardtop 2 Door	180,20	211,27	192,626	32,5268	159	4	DIANTEIRO	1	PMSM		135	188,13	163,99	177,03
2020	Nissan Leaf (40 kW-hr battery pack)	167,77	211,27	186,412	40,25	132	8	DIANTEIRO	1	PMSM		110	262,64	211,31	239,79
2020	Nissan Leaf (62 kW-hr battery pack)	180,20	217,48	192,626	61,6	140,9	11	DIANTEIRO	1	PMSM		160	394,29	325,41	363,71
2020	Nissan Leaf SV/SL (62 kW-hr battery pack)	180,20	223,69	198,839	61,6	140,9	11	DIANTEIRO	1	PMSM		160	376,10	309,80	346,01
2020	Porsche Taycan Turbo	310,69	292,05	304,473	109,65	136	10	TODOS	1	PMSM		170	316,72	331,85	323,48
2020	Porsche Taycan Turbo S	310,69	304,47	310,686	109,65	136	10,5	TODOS	2	PMSM	PMSM	290	306,10	312,53	308,99
2020	Taycan 4S Perf Battery Plus	310,69	298,26	304,473	109,65	136	10,5	TODOS	2	PMSM	PMSM	120	320,10	333,78	326,70
2020	Tesla Model 3 Long Range	155,34	167,77	161,557	80,5	150	10	TRASEIRO	1	PMSM		211	555,22	501,63	531,08
2020	Tesla Model 3 Long Range AWD	167,77	180,20	173,984	80,5	150	10	TODOS	2	MI	PMSM	335	532,85	499,86	518,21
2020	Tesla Model 3 Mid Range	161,56	180,20	167,771	80,5	150	10	TRASEIRO	1	PMSM		211	441,12	404,27	424,87
2020	Tesla Model 3 Standard Range	149,13	167,77	161,557	80,5	150	8,5	TRASEIRO	1	PMSM		211	370,95	332,01	354,05
2020	Tesla Model 3 Standard Range Plus	142,92	161,56	149,129	80,5	150	8,5	TRASEIRO	1	PMSM		211	419,88	373,53	402,34
2020	Tesla Model 3 Long Range AWD P18	167,77	180,20	173,984	80,5	150	10	TODOS	2	MI	PMSM	358	534,62	513,70	518,21
2020	Tesla Model 3 Long Range AWD P19	173,98	186,41	180,198	80,5	150	10	TODOS	2	MI	PMSM	358	502,28	473,79	489,24
2020	Tesla Model 3 Long Range AWD P20	180,20	192,63	186,412	80,5	150	10	TODOS	2	MI	PMSM	358	502,28	455,93	481,19
2020	Tesla Model S Long Range	180,20	192,63	186,412	98	170	12	TODOS	2	MI	PMSM	398	618,47	577,11	600,28

Informações do Carro Elétrico		Eficiência em Wh/km			Informações da Bateria			TREM DE FORÇA	Informações do Motor/Gerador			Autonomia em km			
Ano	Fabricante e Modelo	Cidade E	Estrada E	Comb E	Cap Total (kWh)	EE por massa(Wh/kg)	240V Carg (h)	Eixo de Tração	N de ME M1	M2	Pot Max (kW)	Cidade A	Estrada A	Comb A	
2020	Tesla Model S Long Range Plus	173,98	186,41	180,198	98	170	15,3	TODOS	3	MI	PMSM	568	669,81	617,99	646,95
2020	Tesla Model S P19	198,84	205,05	198,839	98	170	12	TODOS	2	MI	PMSM	398	561,98	558,44	560,05
2020	Tesla Model S P21	211,27	217,48	217,480	98	170	12	TODOS	2	MI	PMSM	398	530,76	518,05	524,64
2020	Tesla Model S Standard Range	186,41	198,84	192,626	98	170	9,2	TODOS	2	MI	PMSM	398	478,78	442,25	461,88
2020	Tesla Model X Long Range	211,27	223,69	217,480	87,5	150	12	TODOS	2	MI	PMSM	398	541,22	511,45	527,86
2020	Tesla Model X Long Range Plus	192,63	205,05	198,839	87,5	150	12	TODOS	2	MI	PMSM	398	583,39	541,86	564,88
2020	Tesla Model X P20	229,91	236,12	236,122	87,5	150	12	TODOS	2	MI	PMSM	580	493,42	486,34	490,85
2020	Tesla Model X P22	260,98	273,40	267,190	87,5	150	12	TODOS	2	MI	PMSM	580	444,66	428,41	437,74
2020	Tesla Model X Standard Range	198,84	217,48	205,053	87,5	150	9,2	TODOS	2	MI	PMSM	398	427,92	398,96	415,21
2020	Tesla Model Y Long Range AWD	167,77	180,20	173,984	80,5	150	10	TODOS	2	MI	PMSM	361	532,21	478,62	508,55
2020	Tesla Model Y Performance AWD	161,56	186,41	173,984	80,5	150	10	TODOS	2	MI	PMSM	358	537,52	468,32	506,94
2020	Tesla Model Y Performance AWD (21" Wheels)	180,20	198,84	186,412	80,5	150	10	TODOS	2	MI	MI	377	485,86	446,11	468,32
2021	Audi e-tron	267,19	267,19	267,190	95,28	135,9	10	TODOS	2	MI	MI	313	358,40	357,11	357,27
2021	Audi e-tron Sportback	273,40	267,19	273,404	95,28	135,9	10	TODOS	2	MI	MI	313	347,62	356,47	350,84
2021	BMW I3 BEV (120 Amp-hour battery)	167,77	205,05	186,412	42,24	153	7	TRASEIRO	1	PMSM		125	267,96	219,51	246,23
2021	BMW I3s BEV (120 Amp-hour battery)	167,77	205,05	186,412	42,24	153	7	TRASEIRO	1	PMSM		135	267,96	219,51	246,23
2021	Chevy Bolt (BEV)	161,56	192,63	180,198	75,4	153,5	9,3	DIANTEIRO	1	PMSM		150	446,91	378,36	416,82
2021	Ford Mustang Mach-E AWD	211,27	242,34	223,694	89,208	159	8,5	TODOS	2	PMSM	PMSM	396	362,91	311,73	339,57
2021	Ford Mustang Mach-E AWD Extended	217,48	248,55	229,908	116,352	166	10,7	TODOS	2	PMSM	PMSM	418	460,91	401,05	434,52
2021	Ford Mustang Mach-E California Route 1 (RWD)	192,63	223,69	205,053	116,352	166	11,4	TRASEIRO	1	PMSM		216	520,62	453,51	490,85
2021	Ford Mustang Mach-E RWD	198,84	223,69	211,267	89,208	159	8,8	TRASEIRO	1	PMSM		198	390,10	346,01	370,15
2021	Ford Mustang Mach-E RWD Extended	198,84	229,91	217,480	116,352	166	10,9	TRASEIRO	1	PMSM		216	512,75	446,00	482,80
2021	Hyundai Ioniq Electric	142,92	173,98	155,343	38,28	112,4	5,8	DIANTEIRO	2	IPMSM		100	295,80	246,71	273,59
2021	Hyundai Kona Electric	155,34	192,63	167,771	64,08	141,3	9	DIANTEIRO	1	IPMSM		150	457,21	363,71	415,21
2021	Kia Niro Electric	167,77	205,05	186,412	64,08	140,4	9,5	DIANTEIRO	1	IPMSM		150	416,82	343,76	384,63
2021	Mini Cooper SE Hardtop 2 Door	180,20	211,27	192,626	32,5268	159	4	DIANTEIRO	1	PMSM		135	188,13	163,99	177,03
2021	Nissan Leaf SV/SL (62 kW-hr battery pack)	180,20	223,69	198,839	61,6	140,9	11	DIANTEIRO	1	PMSM		160	376,10	309,80	346,01
2021	Nissan Leaf (40 kW-hr battery pack)	167,77	211,27	186,412	40,25	132	8	DIANTEIRO	1	PMSM		110	262,64	211,31	239,79
2021	Nissan Leaf (62 kW-hr battery pack)	180,20	217,48	192,626	61,6	140,9	11	DIANTEIRO	1	PMSM		160	394,29	325,41	363,71
2021	Kandi K27	167,77	205,05	186,412	17,67	100,3	7	DIANTEIRO	1	MI		20	103,48	83,04	94,95
2021	Volvo Polestar 2	217,48	236,12	229,908	77,616	156	8	TODOS	2	PMSM	PMSM	150	389,30	357,43	374,98
2021	Porsche Taycan 4S Performance Battery	267,19	260,98	260,977	109,65	133	9,5	TODOS	2	PMSM	PMSM	474	318,17	324,12	320,26
2021	Porsche Taycan 4S Performance Battery Plus	279,62	260,98	267,190	109,65	133	10,5	TODOS	2	PMSM	PMSM	460	352,45	382,54	365,32

Informações do Carro Elétrico		Eficiência em Wh/km			Informações da Bateria			TREM DE FORÇA	Informações do Motor/Gerador			Autonomia em km			
Ano	Fabricante e Modelo	Cidade E	Estrada E	Comb E	Cap Total (kWh)	EE por massa(Wh/kg)	240V Carg (h)	Eixo de Tração	N de ME M1	M2	Pot Max (kW)	Cidade A	Estrada A	Comb A	
2021	Porsche Taycan Performance Battery	267,19	242,34	254,763	109,65	151	9,5	TRASEIRO	1	PMSM	240	307,44	339,02	321,87	
2021	Porsche Taycan Performance Battery Plus	292,05	260,98	279,618	109,65	151	10,5	TRASEIRO	1	PMSM	280	343,92	385,92	362,10	
2021	Tesla Model 3 Long Range AWD	149,13	167,77	155,343	84,6	165	11,2	TODOS	2	MI	PMSM	293	594,65	537,20	568,10
2021	Tesla Model 3 Performance AWD	180,20	198,84	186,412	84,6	165	10	TODOS	2	MI	PMSM	321	528,99	481,19	506,94
2021	Tesla Model 3 Standard Range Plus RWD	136,70	155,34	149,129	56,88	145	7,8	TRASEIRO	1	PMSM	198	446,59	377,71	423,26	
2021	Tesla Model S Performance (19" Wheels)	186,41	198,84	192,626	109,8	165	14,7	TODOS	2	MI	PMSM	425	641,00	600,61	622,81
2021	Tesla Model S Performance (21" Wheels)	211,27	223,69	217,480	109,8	165	14,7	TODOS	2	MI	PMSM	425	551,36	520,14	537,52
2021	Tesla Model X Long Range Plus	192,63	205,05	198,839	109,8	165	15	TODOS	2	MI	PMSM	369	615,09	573,41	597,07
2021	Tesla Model X Performance (20" Wheels)	211,27	217,48	217,480	109,8	165	15	TODOS	2	MI	PMSM	424	560,05	534,62	548,78
2021	Tesla Model X Performance (22" Wheels)	236,12	254,76	242,335	109,8	165	15	TODOS	2	MI	PMSM	424	497,77	465,10	482,80
2021	Tesla Model Y Long Range AWD	161,56	180,20	167,771	84,6	165	10	TODOS	2	MI	PMSM	270	551,20	491,65	524,64
2021	Tesla Model Y Performance AWD	180,20	198,84	186,412	84,6	165	11,8	TODOS	2	MI	PMSM	312	505,98	465,10	487,63
2021	Tesla Model Y Standard Range Plus RWD	149,13	173,98	161,557	56,88	160	8	TRASEIRO	1	PMSM	209	420,84	357,43	392,68	
2021	Volkswagen ID.4 1st	198,84	229,91	217,480	82,368	166,3	7,5	TRASEIRO	1	PMSM	150	429,37	370,47	402,34	
2021	Volkswagen ID.4 Pro S	198,84	229,91	217,480	82,368	166,3	7,5	TRASEIRO	1	PMSM	150	429,37	370,47	402,34	
2021	Volvo XC40 AWD BEV	242,34	292,05	267,190	77,616	156	8	TODOS	2	PMSM	PMSM	150	359,85	302,56	334,74