

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SISTEMAS EMBARCADOS PARA INDÚSTRIA
AUTOMOTIVA

RODRIGO BAGATIN VELEDA BERMUDEZ

**OS DESAFIOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS
NO BRASIL**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA
2021

RODRIGO BAGATIN VELEDA BERMUDEZ

OS DESAFIOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL

Monografia de Especialização, apresentada ao Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: Prof. M. Sc. Olício da Silva Junior

CURITIBA
2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrônica
Curso de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria
Automotiva



TERMO DE APROVAÇÃO

OS DESAFIOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL

por

RODRIGO BAGATIN VELEDA BERMUDEZ

Esta monografia foi apresentada em 09 de Dezembro de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. M. Sc. Olício da Silva Junior
Orientador

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas
Membro titular

Prof. M. Sc. Omero Francisco Bertol
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas de que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Ao Prof. Dr. Olício da Silva Junior, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

À instituição de ensino UTFPR, essencial no meu processo de formação profissional, pela dedicação, e por tudo o que aprendi ao longo da especialização.

Aos meus pais, Álvaro e Beatriz, e irmãos, Mariane e Pedro, que me apoiaram ao longo de todo o curso.

A minha namorada, Paola, que também me incentivou muito e compreendeu minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

A todos os amigos que de alguma forma fizeram parte dessa jornada eu agradeço com um forte abraço.

RESUMO

BERMUDEZ, Rodrigo Bagatin Veleda. **Os Desafios para Implementação de Veículos Elétricos no Brasil**. 2021. 43 p. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Inicialmente, os veículos eram movidos a vapor, a eletricidade ou a gasolina. Em virtude do desenvolvimento das indústrias petrolíferas, os veículos de combustão interna prevaleceram por quase um século. No entanto, com a preocupação crescente sobre os impactos ambientais gerados pela queima de combustíveis fósseis, diversos fabricantes de automóveis estão investindo para produzir veículos elétricos a bateria eficientes, potentes, que tenham autonomia para percorrer grandes trajetos. Porém, o Brasil ainda faz pouco para fomentar essa classe de veículos, quanto a incentivos fiscais e pesquisas. Atualmente, a maioria dos modelos devem ser importados e os custos para tal são muito elevados. Por fim, é realizada uma análise ambiental sobre os impactos causados pelas duas classes de veículos, ou seja, a combustão interna e elétrico a bateria. Apesar de os veículos elétricos não gerarem gases que contribuem com o aquecimento global durante seu funcionamento, apresenta algumas questões controversas como as baterias de íon-lítio que ainda apresentam taxas baixas de reciclagem ou reutilização; e questões como a extração de matérias-primas que podem ser tóxicas.

Palavras-chave: Veículo elétrico. Motor elétrico. Bateria de íon-lítio. Análise técnica. Impactos ambientais.

ABSTRACT

BERMUDEZ, Rodrigo Bagatin Veleda. **The Challenges for the Implementation of Electric Vehicles in Brazil**. 2021. 43 p. Monografia de Especialização em Sistemas Embarcados para Indústria Automotiva, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Initially, vehicles were powered by steam, electricity or gasoline. Due to the development of the oil industries, internal combustion vehicles prevailed for nearly a century. This has become a global matter due to the impact on the environment from the combustion engines exhaust gases, hence several the car manufacturers are increasing their investments on the production of electric vehicles. That depends on batteries efficient and powerful, capable to powered up the EV. One of the challenges is to assure the autonomy of EV to travel long distances. However Brazilian investments in this area are still too small either in terms of tax incentives or fomenting research in this area. Currently, most of the models must be imported and this is expensive. Finally, an environmental analysis is carried out on the impacts caused by two classes of vehicles, which means, internal combustion and battery-powered electric. Although the electric vehicles do not generate gases that contribute to global warming during their operation, they present some controversial issues such as lithium-ion batteries that still have low recycling or reuse rates; and issues such as extraction of raw materials that can be toxic.

Keywords: Electric vehicle. Electric motor. Lithium-ion battery. Technical analysis. Environmental impacts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Motor elétrico de Jedlik integrado a carro rústico	12
Figura 2 – Carruagem de Robert Anderson	13
Figura 3 – O modelo de Davenport de "trem" elétrico	13
Figura 4 – Carro elétrico de S. Stratingh e C. Becker	14
Figura 5 – Bateria de chumbo-ácido de Gaston Planté.....	15
Figura 6 – Triciclo de Gustave Trouvé	16
Figura 7 – Triciclo elétrico de W. Ayrton e J. Perry	17
Figura 8 – Electrobat criado por Henry G. Morris e Pedro G. Salom.....	18
Figura 9 – Táxi elétrico de Walter Bersey	18
Figura 10 – Diagrama simplificado dos HEVs	20
Figura 11 – Diagrama simplificado dos PHEVs.....	21
Figura 12 – Diagrama simplificado dos VEBs	21
Figura 13 – Fluxograma das configurações principais de automóveis	22
Figura 14 – Representação do rotor e estator.....	23
Figura 15 – Componentes do motor CC com escovas.....	24
Figura 16 – Representação do motor de indução	25
Figura 17 – Motor síncrono de imã permanente.....	26
Figura 18 – Funcionamento do rotor e estator no motor de indução.....	27
Figura 19 – Funcionamento do motor de imã permanente.....	27
Figura 20 – Força eletromotriz induzida	28
Figura 21 – Relutância magnética do rotor, no motor SynRM.....	29
Figura 22 – Tesla Model 3 performance AWD 2019	31
Figura 23 – Principais componentes elétricos do Tesla Model 3.....	31
Figura 24 – Autonomia dos principais veículos elétricos a bateria comercializados atualmente.....	33
Figura 25 – Renault Sandero Authentique	34
Figura 26 – Selo de etiquetagem do INMETRO para o Renault Sandero	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ranking de vendas de veículos elétricos em 2020	30
Tabela 2 – Características do Tesla Model 3	32
Tabela 3 – Tempo de carregamento do Tesla Model 3	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Especificações dos veículos Tesla Model 3 e Renault Sandero	36
Quadro 2 – Emissões de dióxido de carbono dos veículos Tesla Model 3 e Renault Sandero.....	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Relação entre torque e escorregamento em motores de indução CA	29
---	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 PROBLEMA	10
1.2 OBJETIVOS	10
1.2.1 Objetivo Geral	10
1.2.2 Objetivos Específicos	10
1.3 JUSTIFICATIVA	11
2 DESENVOLVIMENTO	12
2.1 HISTÓRIA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS	12
2.2 TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS	19
2.2.1 Veículos elétricos híbridos (HEVs)	19
2.2.2 Veículos elétrico híbridos plug-in (PHEVs).....	20
2.2.3 Veículos elétrico a bateria (VEBs).....	21
2.3 TIPOS DE MOTORES USADOS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS	22
2.3.1 Motor de corrente contínua	23
2.3.2 Motor de indução.....	24
2.3.3 Motor síncrono de ímã permanente.....	25
2.3.4 Motor de relutância comutada	26
2.3.5 Motor IPM-SynRM: motor de ímã permanente interno–síncrono de relutância	27
3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	30
3.1 TESLA MODEL 3	30
3.2 RENAULT SANDERO	34
3.3 ANÁLISE TÉCNICA E AMBIENTAL	36
4 CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, há uma preocupação mundial gradativa, principalmente entre os países que integram o G20, quanto a utilização de energia limpa e renovável nos diversos setores da economia. Esses países estão investindo recursos e capital com o objetivo de atender os requisitos estipulados pelo Acordo de Paris: (a) assegurar que o aumento da temperatura média global fique abaixo de 2 °C acima dos níveis pré-industriais e prosseguir os esforços para limitar o aumento da temperatura a até 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais; (b) aumentar a capacidade de adaptação aos impactos adversos das alterações climáticas e promover a resiliência do clima e o baixo desenvolvimento de emissões de gases do efeito estufa, de maneira que não ameace a produção de alimentos; (c) criar fluxos financeiros consistentes na direção de promover baixas emissões de gases de efeito estufa e o desenvolvimento resistente ao clima.

Dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) indicam que os meios de transporte são os principais emissores de gases do efeito estufa, alcançando nível de 196,5 Mt CO₂ em 2019, aumento de 1% em relação ao índice de 2018, devido aumento da demanda por combustíveis fósseis. Em contrapartida, o ano de 2019 teve consumo recorde de biocombustíveis como etanol e biodiesel no Brasil.

Essa preocupação do poder público e da sociedade, somado aos incentivos fiscais, avanços tecnológicos e popularização do produto, fazem com que as vendas de veículos elétricos batam recordes de vendas a cada ano. Segundo dados do EV Volumes (*Electric Vehicle World Sales Database*), as vendas desse tipo de produto aumentaram 43% em 2020 em relação ao ano anterior, enquanto as vendas de carros caíram 20%, no cenário mundial.

No Brasil, os números de vendas de carros elétricos e híbridos também bateram recordes. Segundo dados da Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE), no quadrimestre de janeiro a abril de 2021 foram emplacados 7.290 veículos eletrificados (híbridos, híbridos plug-in e elétricos), o que representou um aumento de 29,4% em relação ao mesmo período do ano anterior. Apesar de ser um aumento considerável, o Brasil ainda está atrasado em relação aos países mais desenvolvidos, visto que esse número representa apenas 1,6% do mercado.

1.1 PROBLEMA

Como pode ser explicada a diferença de representatividade dos veículos elétricos no cenário nacional em relação ao global? Vários países europeus: Noruega, Islândia, Suécia, Holanda, Finlândia entre outros, atingiram índices de vendas de carros elétricos maiores que 10% em relação a venda total de carros. Quais medidas devem ser tomadas para difusão desse produto no Brasil?

Além disso, o que deve ser feito para que a difusão de veículos elétricos e híbridos na sociedade ocorra de forma efetiva e sem gerar novos problemas a sociedade? Essa tecnologia traz impactos à sociedade e ao meio-ambiente?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Apontar e indicar possíveis soluções para os desafios a serem superados pelo país para implementação ampla dos veículos elétricos e híbridos.

1.2.2 Objetivos Específicos

Etapas a serem realizadas para atingir-se o Objetivo Geral neste Trabalho de Conclusão de Curso de Especialização são:

- Analisar o histórico dos veículos elétricos e como a tecnologia se desenvolveu ao longo tempo;
- Identificar as medidas tomadas pelos países que lideram os rankings de vendas de carros elétricos;
- Estudar a disponibilidade de baterias de íon de lítio (tecnologia empregada atualmente) e se haveria disponibilidade dos materiais necessários para sua fabricação no cenário de implementação mundial ampla;
- Analisar os dados ambientais atrelados as baterias de íon de lítio e estudar formas de minimizá-los;
- Avaliar a demanda de estações de carregamento.

1.3 JUSTIFICATIVA

É visível que a sociedade vive um período de transformação em relação aos veículos de uso pessoal. A redução do custo das baterias de íons de lítio, os incentivos fiscais e a consciência dos danos causados por combustíveis fósseis são fatores que contribuem para a popularização de veículos elétricos, assim como de veículos híbridos.

Porém, essas tecnologias apresentam limitações, requisitos e impactos ambientais que não podem ser negligenciados. Para isso, o poder público deverá fornecer recursos para que a implementação seja ampla e efetiva, além de estudar meios de combater os impactos gerados.

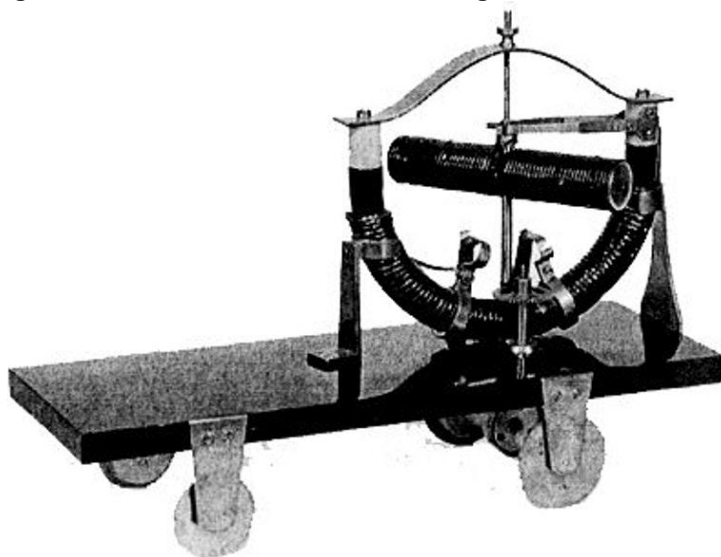
2 DESENVOLVIMENTO

2.1 HISTÓRIA DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS

Os primeiros veículos elétricos foram criados em meados do século XIX e precederam a invenção do motor de propulsão a gasolina por Daimler e Benz, na Alemanha em 1885. Antes que esta tecnologia se impusesse até os dias atuais, eram relativamente prósperas as manufaturas de veículos elétricos como os bondes, que ganhavam espaços nas ruas de cidades dos Estados Unidos e Europa, no fim do século XIX (MARTINS, 2015).

A invenção do veículo elétrico é atribuída a várias pessoas, porém o húngaro Ányos Jedlik (1800-1895) é considerado o precursor por inventar em 1827 um tipo rudimentar de motor elétrico, apresentado na Figura 1. Um ano depois, Jedlik integrou esse motor a um pequeno modelo de carro (MATULKA, 2014).

Figura 1 – Motor elétrico de Jedlik integrado a carro rústico



Fonte: Matulka (2014).

Robert Anderson lançou o primeiro protótipo de carruagem movida a eletricidade usando bateria não recarregável, também conhecida como célula primária, entre os anos 1832 e 1839 (Figura 2). O inventor escocês integrou um motor e uma bateria a carruagem, eliminando o cavalo como principal requisito para este meio de transporte centenário. As células primárias utilizavam petróleo bruto como gerador de energia. Sua ideia foi inovadora e serviu de inspiração para os inventores que o sucederam (MORIMOTO, 2015).

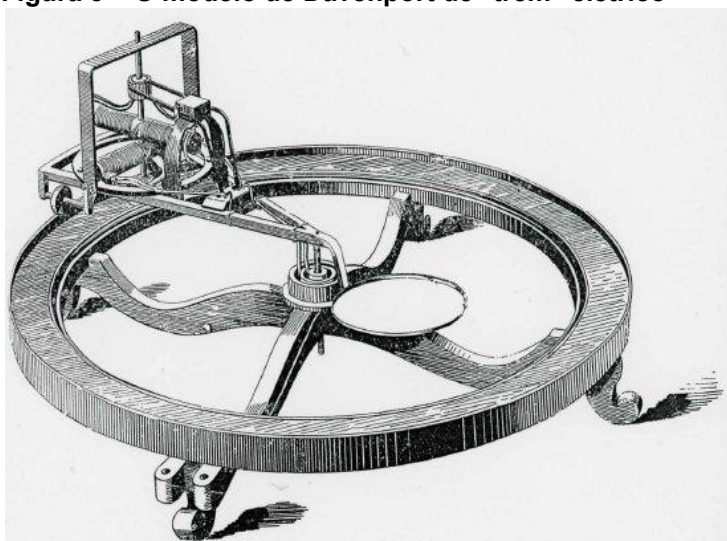
Figura 2 – Carruagem de Robert Anderson



Fonte: Matulka (2014).

Em 1834, o norte-americano Thomas Davenport (1802-1851), o inventor do primeiro motor elétrico americano de corrente contínua, instalou seu motor em um pequeno modelo de carro que foi usado em uma pista circular eletrificada de 4 pés de diâmetro (aproximadamente 1,20 m). A energia era fornecida por uma bateria estacionária ao “trem” elétrico em movimento, apresentado na Figura 3, utilizando os trilhos como condutores (MATULKA, 2014).

Figura 3 – O modelo de Davenport de "trem" elétrico



Fonte: Pope (1891).

Em 1835, o professor holandês Sibrandus Stratingh (1785-1841) e seu assistente Christopher Becker criaram um carro elétrico em pequena escala, alimentado por células primárias não recarregáveis, mostrado na Figura 4. Os

princípios físicos desenvolvidos por Michael Faraday foram importantes para a construção desse modelo, que alguns consideram o precursor dos carros elétricos (MATULKA, 2014).

Figura 4 – Carro elétrico de S. Stratingh e C. Becker



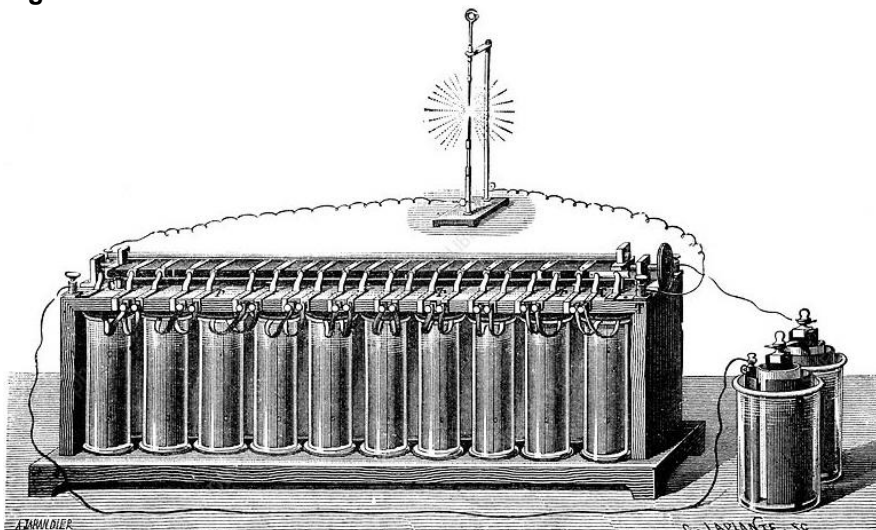
Fonte: Manz (2017).

O escocês Robert Davidson fez um modelo de locomotiva elétrica em 1837. Davidson fez pequenos motores elétricos em seus próprios princípios, embora William H. Taylor nos EUA fizesse motores semelhantes a partir de 1838. Ambos trabalharam independentemente, sem conhecimento do trabalho do outro. O Galvani de Davidson de 1842 era uma máquina de quatro rodas, movida por baterias de ácido de zinco (células galvânicas). Foi testado na linha Edimburgo-Glasgow em setembro de 1842 e, embora fosse capaz de se locomover a 4 mi/h (aproximadamente 6,5 km/h), não transportava passageiros ou mercadorias (MATULKA, 2014).

No ano de 1859 aconteceu um marco relevante para o futuro dos veículos elétricos. O francês Raymond Gaston Planté (1834-1889) inventou as primeiras baterias recarregáveis que forneciam um meio viável de armazenar energia a bordo do veículo. As baterias de chumbo-ácido, exemplificada na Figura 5, são um tipo de bateria de eletrodos de chumbo submersos no seu eletrólito que consiste em uma solução amena de ácido sulfúrico em um recipiente. O nome origina da combinação dos eletrodos de chumbo e do ácido utilizado para gerar eletricidade nessas baterias. Após tantos anos de utilização, essa bateria já é bem conhecida e apresenta custo de produção reduzido, porém produz gases perigosos quando

funciona em recipiente aberto e, ao ser carregada demais, pode haver risco de explosão. Segundo Martins (2015), “suas aplicações atuais em veículos elétricos estão limitadas a veículos industriais, como empilhadeiras e outros veículos de baixa velocidade, e o tempo de vida útil é de três a cinco anos” (*appud* GERSSEN-GONDELACH; FAAIJ, 2012).

Figura 5 – Bateria de chumbo-ácido de Gaston Planté



Fonte: Plante Accumulator Battery, crédito SCIENCE PHOTO LIBRARY. Disponível em: <<https://www.sciencephoto.com/media/656811/view/plante-accumulator-battery-1859>>. Acesso em: 4 out. 2021.

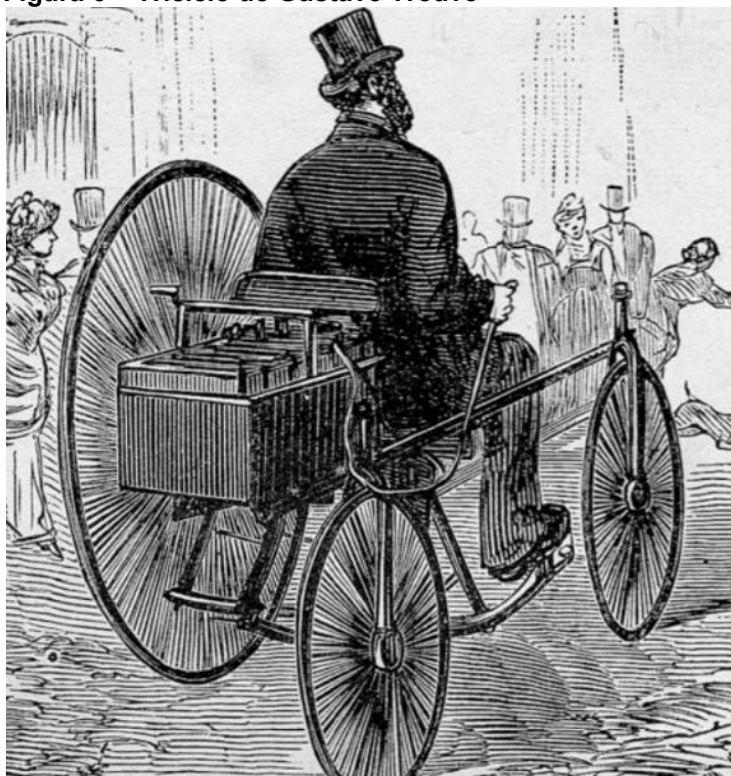
Camille Faure (1874-1956), um engenheiro químico francês, patenteou um método pelo qual revestiu placas de chumbo com uma pasta de óxidos de chumbo, ácido sulfúrico e água em 1881. Em seguida, fez a cura através do aquecimento em atmosfera úmida. Isso fez com que a pasta se tornasse uma mistura de sulfatos de chumbo que aderiam firmemente às placas de chumbo. Após aplicação de carga elétrica, a pasta curada tornou-se um material eletroquimicamente ativo (RICHARD, 2018a).

Dessa forma, Faure inventou uma bateria muito mais densa e compacta em comparação com a de Gaston Planté. Esse foi um avanço tecnológico significativo que levou à fabricação industrial de baterias de chumbo-ácido e um modelo mais eficiente e confiável que alimentaram os carros elétricos por muitos anos (MATULKA, 2014).

O primeiro veículo elétrico de transporte humano oficialmente reconhecido foi o *Trouvé tricycle*, criado por Gustave Trouvé (1839-1902) em 1881 (Figura 6). O inventor francês melhorou a eficiência de um pequeno motor elétrico desenvolvido

pela Siemens (a partir de um projeto de Johann Kravogl), integrando-o a uma bateria recarregável e adaptou esse sistema ao triciclo inglês James Starley. Trouvé testou o veículo com sucesso nas ruas de Paris no dia 19 de abril de 1881, mas não conseguiu patentear-lo, pois não havia inventado o motor, o veículo ou as baterias (RICHARD, 2018b).

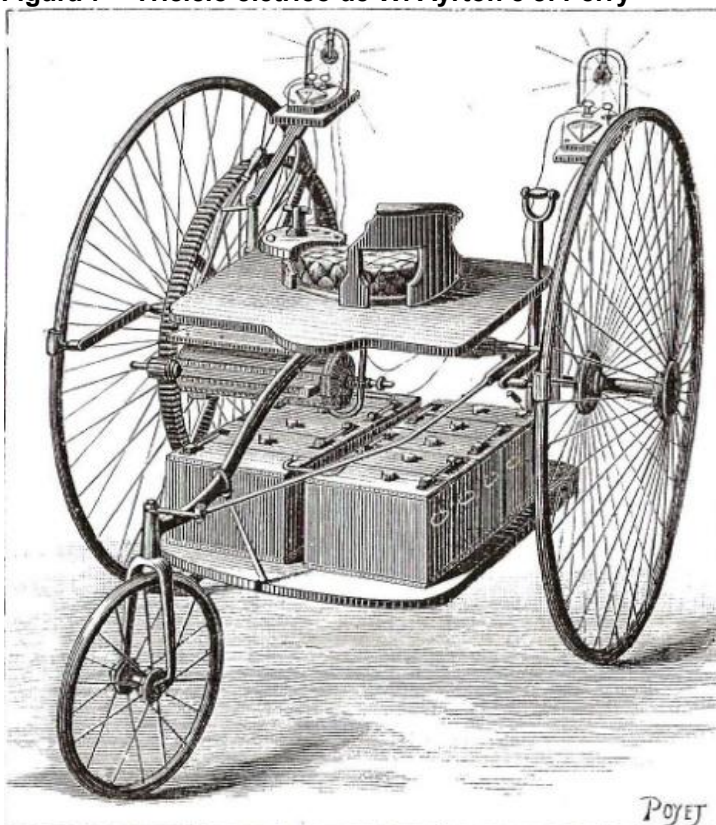
Figura 6 – Triciclo de Gustave Trouvé



Fonte: Richard (2018b).

Ainda em 1881, os ingleses William Ayrton (1847-1908) e John Perry (1850-1920) da Inglaterra construíram um triciclo elétrico com duas rodas grandes atrás, com a direita acionada, e uma pequena roda dianteira, como pode ser observado na Figura 7. O triciclo elétrico usava dez das baterias de chumbo-ácido de Planté em série, fornecendo 1/2 cavalo-vapor. O controle da velocidade era feito ao ligar ou desligar as baterias de chumbo-ácido. O triciclo era capaz de atingir uma distância entre 10 e 25 milhas e uma velocidade máxima de 9 mi/h (aproximadamente 14,5 km/h), dependendo do terreno. O triciclo de Ayrton e Perry foi o primeiro veículo a ter iluminação elétrica (MATULKA, 2014).

Figura 7 – Triciclo elétrico de W. Ayrton e J. Perry



Fonte: Richard (2018c).

O engenheiro alemão Andreas Flocken (1845-1913) construiu o primeiro carro elétrico real em 1888. A documentação sobre o trabalho de desenvolvimento de Flocken é escassa. Ele equipou uma carruagem de rodas altas com um motor elétrico, o qual transferia 0,9 kW de potência ao eixo traseiro através de tiras de couro. O veículo de madeira pesava aproximadamente 400 kg e atingia velocidade máxima de 15 km/h (NABEEL, 2020).

Em 1894, o engenheiro mecânico Henry G. Morris (1835-1870) e o químico Pedro G. Salom (1856-1945) construíram o Electrobat, apresentado na Figura 8, o primeiro automóvel elétrico de sucesso, na Filadélfia. Ambos tinham experiência em bondes com bateria e, à medida que esses estavam se tornando obsoletos, se uniram para fabricar veículos rodoviários com bateria. A invenção foi patenteada em 31 de agosto de 1894. Construído como uma versão pequena de um bonde de bateria, era um veículo lento (velocidade máxima de 24 km/h), pesado (aproximadamente 2.000 kg) e possuía pneus de aço para suportar sua grande bateria de chumbo-ácido. Ele entrou em produção em 1895. Mais tarde, o Electrobat foi redesenhado (com ajuda dos eixos e rolamentos de Walter Baker) primeiro como um carro de corrida e depois como táxi elétrico (MATULKA, 2014).

Figura 8 – Electrobat criado por Henry G. Morris e Pedro G. Salom



Fonte: Matulka (2014).

Os táxis elétricos movidos a bateria tornaram-se disponíveis no final do século XIX. Em Londres, Walter Bersey projetou uma frota de táxis elétricos e os apresentou às ruas de Londres em 1897 (Figura 9). No mesmo ano, na cidade de Nova York, a Samuel's Electric Carriage and Wagon Company começou a disponibilizar táxis elétricos (HURLEY, 2012).

Figura 9 – Táxi elétrico de Walter Bersey



Fonte: Hurley (2012).

Nessa época, os veículos elétricos tinham uma série de vantagens sobre seus concorrentes. Eles não tinham vibração, cheiro e ruído associados aos carros de gasolina. Além disso, não exigiam mudança de marcha (embora os carros a vapor

também tivessem essa vantagem, sofriam com longos tempos de partida – podia chegar a 45 minutos em dias frios) e esforço manual para dar a partida, como os carros a gasolina que apresentavam uma manivela para acionamento do motor.

A aceitação de carros elétricos foi inicialmente dificultada pela falta de infraestrutura de energia, mas em 1912, muitas casas foram conectadas para eletricidade, permitindo um aumento na popularidade dos carros. Nos Estados Unidos, na virada do século, 40% dos automóveis eram movidos a vapor, 38% a eletricidade e 22% a gasolina. Um total de 33.842 carros elétricos foram registrados nos Estados Unidos, e os EUA se tornaram o país onde os carros elétricos tiveram maior aceitação. A maioria dos primeiros veículos elétricos eram carruagens enormes e ornamentadas, projetadas para os clientes da classe alta. Eles apresentavam interiores luxuosos e estavam repletos de materiais caros. As vendas de carros elétricos atingiram o pico no início dos anos 1910. De acordo com o livro *Standard Catalog of American Cars 1805-1942*, havia mais de 300 fabricantes listados que produziram veículos nos Estados Unidos (PURDY; FOSTER, 2007).

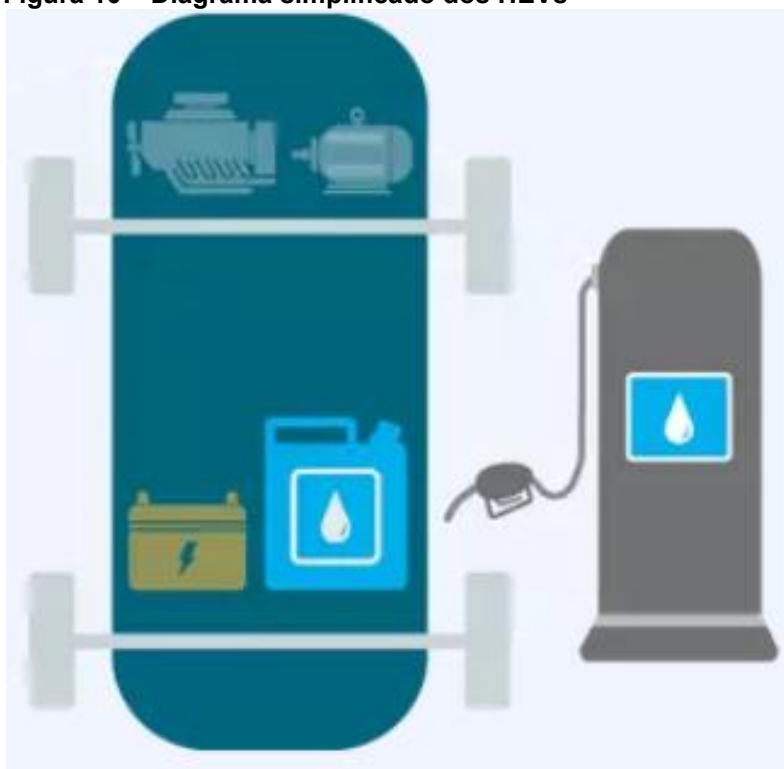
2.2 TIPOS DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

Veículos elétricos (VE) são automóveis movidos por um ou mais motores elétricos, podem ser classificados em algumas categorias. Os principais tipos de veículos elétricos são: (a) Veículos elétricos híbridos (HEVs); (b) Veículos elétrico híbridos plug-in (PHEVs); e (c) Veículos elétrico a bateria (VEBs).

2.2.1 Veículos elétricos híbridos (HEVs)

Os veículos elétricos híbridos são movidos por um motor de combustão interna e um motor elétrico, que utiliza energia armazenada em baterias. A bateria é recarregada através da frenagem regenerativa e pelo motor de combustão interna. Em um veículo com motor de combustão interna tradicional, essa energia de frenagem é perdida na forma de calor nas pastilhas e rotores do freio. A bateria pode alimentar cargas auxiliares e reduzir a marcha lenta do motor quando parado. Juntos, esses recursos, esquematizados na Figura 10, resultam em melhor economia de combustível sem comprometer o desempenho (EVGO, 2020).

Figura 10 – Diagrama simplificado dos HEVs



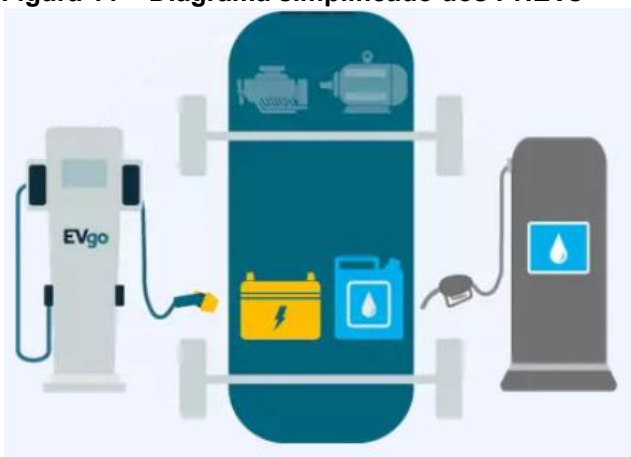
Fonte: EVgo (2020).

2.2.2 Veículos elétrico híbridos plug-in (PHEVs)

Os veículos elétricos híbridos plug-in, ou PHEVs, apresentam um motor tradicional e um motor elétrico, semelhante aos HEVs. Eles diferem dos híbridos regulares por terem uma bateria muito maior e serem capazes de se conectar à rede para recarregar (além da frenagem regenerativa). Enquanto os híbridos regulares podem viajar 1-2 milhas antes de o motor a gasolina ligar, os PHEVs podem ir de 16 a 40 milhas antes que seus motores a gasolina forneçam assistência. Assim que o alcance totalmente elétrico se esgota, os PHEVs agem como híbridos regulares e podem viajar centenas de quilômetros com um tanque de gasolina. Todos os PHEVs podem ser carregados, mas a maioria não é capaz de suportar o carregamento rápido (EVGO, 2020).

Exemplos de PHEVs, esquematizados na Figura 11: Audi A3 E-Tron, BMW 330e, BMWi8, BMWx5 xdrive40e, Chevy Volt, Chrysler Pacifica, Fiat 500e, Ford C-Max Energi, Ford Fusion Energi, Hyundai Sonata, Kia Optima, Mercedes C530e, Mercedes S550e, Mercedes GLE550e, Mini Cooper SE Countryman, Porsche Cayenne S E-Hybrid, Porsche Panamera S E-Hybrid, Toyota Prius, Volvo XC90 TB.

Figura 11 – Diagrama simplificado dos PHEVs



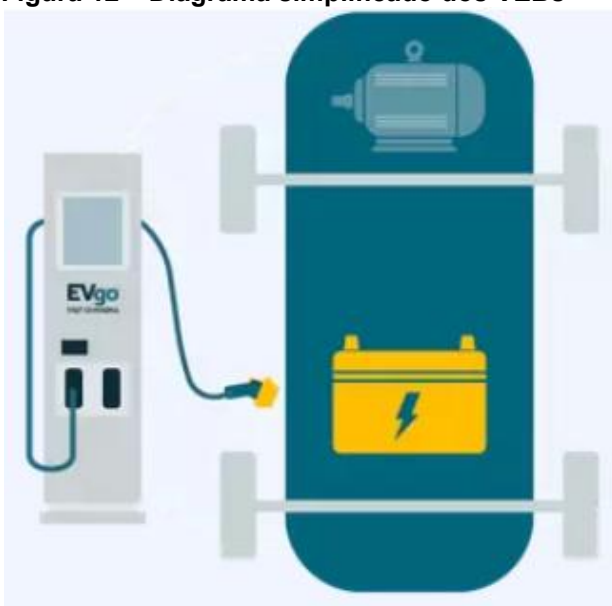
Fonte: EVgo (2020).

2.2.3 Veículos elétrico a bateria (VEBs)

Os veículos elétricos a bateria (VEBs) são veículos totalmente elétricos com baterias recarregáveis e sem motor a gasolina. Toda a energia para movimentar o veículo vem da bateria recarregada da rede. Os VEBs são veículos de “zero emissão”, pois não geram emissões prejudiciais pelo escapamento, como ocorre nos veículos tradicionais movidos a gasolina (EVGO, 2020).

Exemplos de VEBs: Audi e-tron, BMW i3/i3s, Chevrolet Bolt EV, Hyundai Kona Electric, Hyundai Ioniq Electric, Jaguar I-Pace, Kia Niro EV, Mini Cooper Electric, Nissan Leaf, Porsche Taycan Turbo, Tesla Model S, Tesla Model X, Tesla Model 3, Tesla Model Y, VW E-Golf, Porsche Taycan 4S.

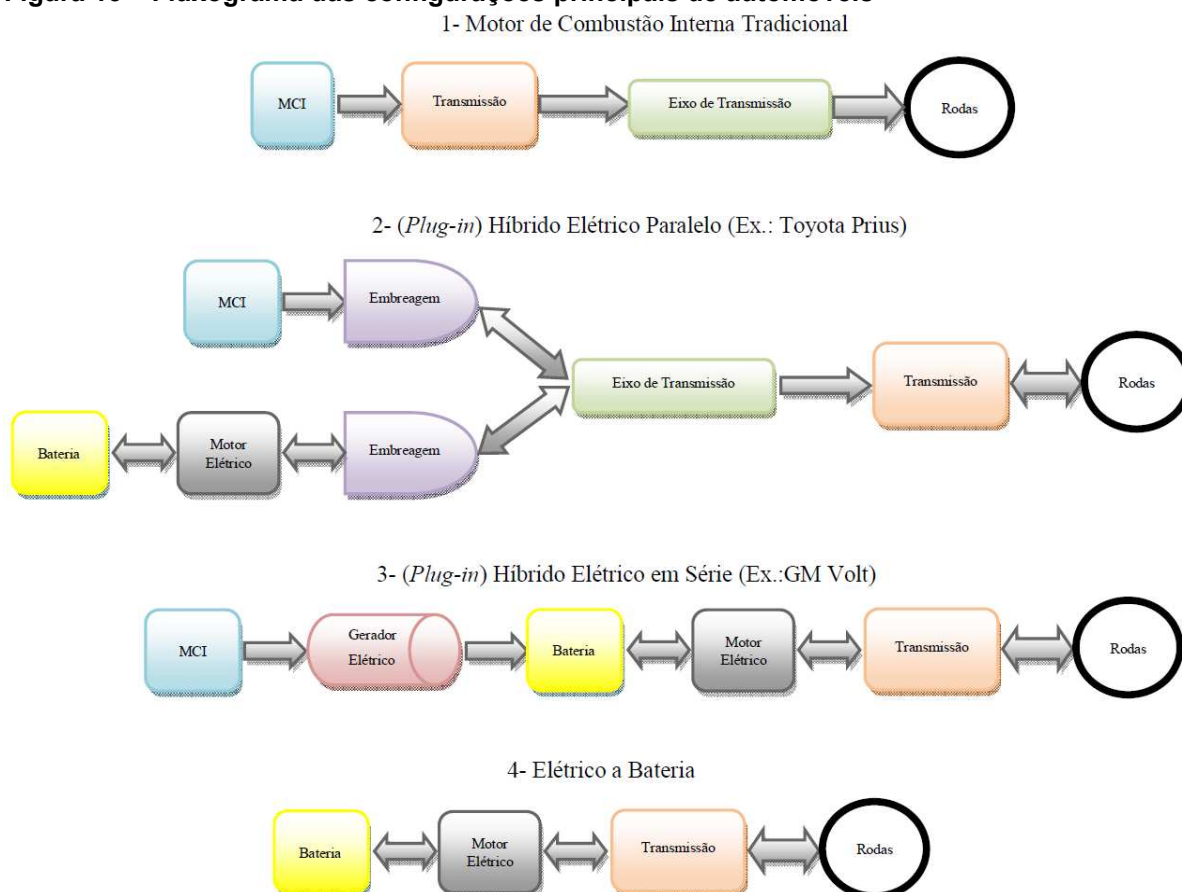
Figura 12 – Diagrama simplificado dos VEBs



Fonte: EVgo (2020).

A Figura 13 mostra o fluxo de potência dos diferentes tipos de veículos: MCI tradicional; híbrido elétrico em paralelo ou série (plug-in ou não); e elétrico a bateria (BARAN, 2012).

Figura 13 – Fluxograma das configurações principais de automóveis



Fonte: Baran (2012).

2.3 TIPOS DE MOTORES USADOS EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

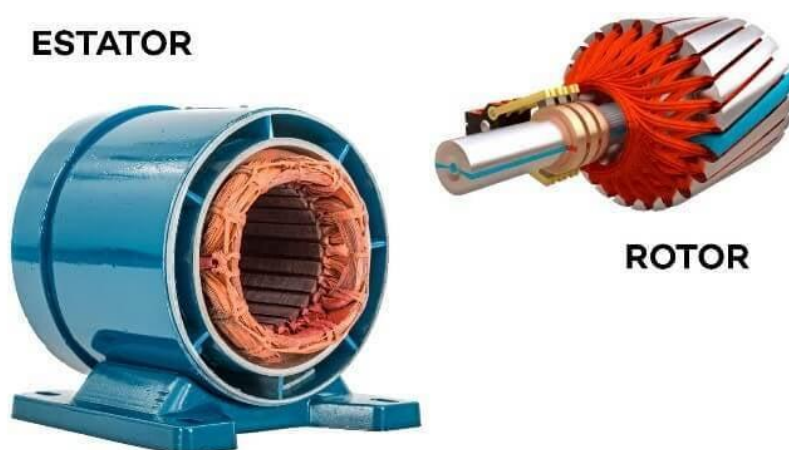
O elemento central do veículo elétrico, que substitui os motores de combustão interna é o motor elétrico. O rápido desenvolvimento no campo da eletrônica de potência e técnicas de controle criou um espaço para vários tipos de motores elétricos a serem usados em veículos elétricos. As principais características requeridas para tal aplicação automotiva é o alto torque de partida, alta densidade de potência, boa eficiência (KARTHIK, 2019).

Os carros elétricos utilizam uma tecnologia automotiva diferente dos veículos a motor à combustão. A performance de um veículo elétrico depende fortemente do tipo de motor envolvido e do tamanho do banco de baterias, não ignorando que o

peso do carro e aceleração desejada também influenciam. O design do motor elétrico deve ser desenvolvido de forma que o veículo consiga gerar o máximo de energia possível para ser armazenada nas baterias e depois alimentar as rodas sem muitas perdas (NEOCHARGE, 2020).

O princípio básico de operação de um motor elétrico não mudou desde que a tecnologia foi inventada no século 19. O motor consiste em dois elementos, apresentados na Figura 14: estacionário (ESTATOR) e um rotativo (ROTOR), no qual ficam anexados dentro de uma carcaça, juntamente com outros itens que compõe o motor elétrico. Quando a corrente elétrica passa pelo motor, os dois elementos, que possuem campos magnéticos diferentes, se repelem causando a rotação do rotor dentro do estator (NEOCHARGE, 2020).

Figura 14 – Representação do rotor e estator



Fonte: NeoCharge (2020).

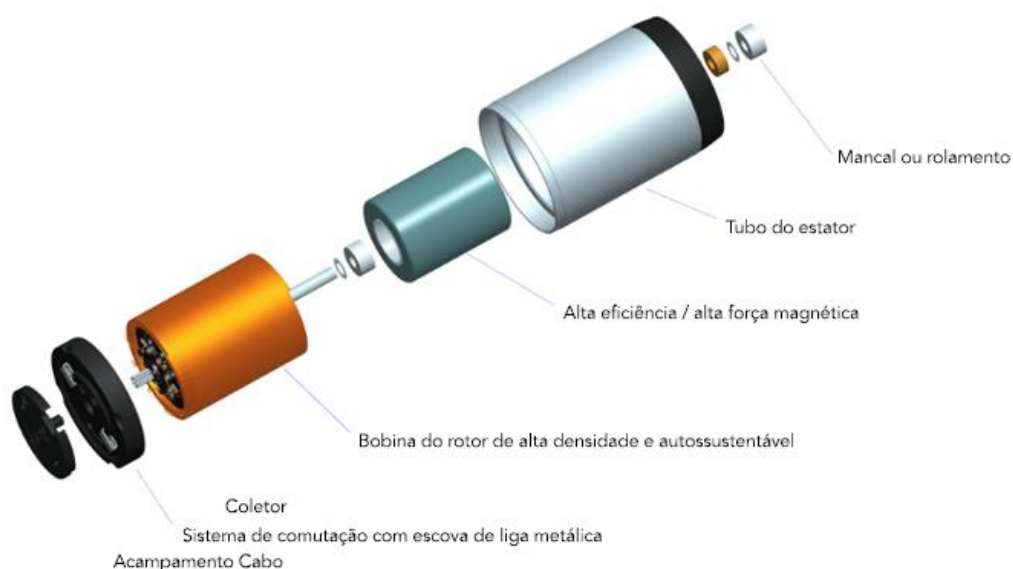
Os principais tipos de motores elétricos empregados em Ves são: (a) Motor de corrente contínua; (b) Motor de indução; (c) Motor síncrono de ímã permanente; (d) Motor de relutância comutada; e (e) Motor IPM-SynRM (Motor de Ímã Permanente Interno – Síncrono de Relutância).

2.3.1 Motor de corrente contínua

Um motor de Corrente Contínua (CC), apresentado na Figura 15, nada mais é do que um motor alimentado por CC, sendo esta alimentação proveniente de uma bateria ou qualquer outra de alimentação CC. A sua comutação (troca de energia

entre rotor e estator) pode ser através de escovas (escovado) ou sem escovas (brushless) e com relação a velocidade, o motor CC pode ser controlado apenas variando a sua tensão, diferentemente de um motor elétrico de corrente alternada (CA) cuja velocidade é variada pela frequência. Os motores de corrente contínua possuem dois tipos de configuração. A configuração “shunt” onde os enrolamentos do indutor e do induzido estão ligados em paralelo, o que permite a operação em velocidade constante. E a configuração em série, onde a potência é constante. A configuração em série e escovado é a mais utilizada em veículos elétricos, pois possui características como ampla variação de velocidade, controle relativamente fácil e velocidade ideal para tração (ENGELMANN, 1994).

Figura 15 – Componentes do motor CC com escovas



Fonte: Portescap (2014).

2.3.2 Motor de indução

O motor de indução funciona por corrente alternada e é construído de tal maneira que se têm dois campos magnéticos girantes. O campo magnético do rotor tende a alinhar-se com o campo do estator sendo induzida uma força eletromotriz que produz o movimento de rotação do rotor. A velocidade de rotação do rotor, tem um ligeiro atraso em relação ao campo magnético girante, devido à carga aplicada ao motor, daí a designação de motor assíncrono. O rotor em gaiola de esquilo é o mais utilizado em automóveis por não conter escovas, sendo mais barato e exigindo menos manutenções. Porém seu torque de arranque não é muito elevado resultando

em uma rotação inicial lenta. Novas tecnologias de motores de indução têm chamado atenção de algumas marcas de automóveis elétricos (AZEVEDO, 2018).

Os motores de indução, apresentado na Figura 16, são considerados os mais comuns e melhores custo-benefício do mercado. Eles fazem parte da família dos motores de corrente alternada (CA) e não precisam de ímãs permanentes; ao invés disso, o campo magnético é produzido pela corrente elétrica que passa pelas bobinas fixadas no estator. Caso uma corrente alternada seja ligada ao estator, o campo magnético também será alternado (NEOCHARGE, 2020).

Modelos de carros elétricos mais conhecidos que utilizam esse tipo de motor: Tesla Model S, Tesla Model X, Toyota RAV4, Mahindra Reva e2o.

Figura 16 – Representação do motor de indução



Fonte: NeoCharge (2020).

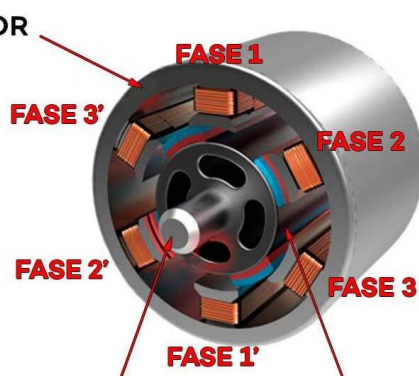
2.3.3 Motor síncrono de ímã permanente

O princípio básico de operação de um motor síncrono de ímã permanente, apresentado na Figura 17, é que a corrente de campo produz um campo magnético estacionário. Da mesma forma as correntes circulantes no estator do motor síncrono produzirão um campo magnético girante. Assim, existem dois campos presentes no motor e o campo do rotor tenderá a se alinhar com o campo do estator à medida que este gira. Possuem torque elevado e são relativamente pequenos se comparados aos motores de indução para uma mesma potência. Podem ser do tipo BLDC (Brushless DC) ou PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor). O motor BLDC é na verdade um motor CA, chama-se Brushless DC porque foi desenvolvido a partir do motor DC com escovas e porque as características de velocidade e binário são muito semelhantes aos motores CC com escovas. O motor BLDC (*Brushless DC*) é também conhecido por ECM (*Electronically Commutated Motor*), não possui escovas sendo a comutação feita eletronicamente. Assim este tipo de motor não tem os problemas associados à comutação por escovas, no entanto o controle acrescenta

um custo considerável na sua aplicação. A comutação da corrente, entre os enrolamentos do estator, deve ser sincronizada com a posição do rotor, para tal são usados sensores, sendo comum usar sensores de efeito Hall e sensores ópticos. Os motores PMSM requerem uma alimentação com onda senoidal, podem ter os ímãs montados à superfície do rotor ou em posição interior, tem um controle mais complexo do que os BLDC, e necessitam de um sensor de corrente por cada fase (caso sejam trifásicos). São motores propícios a aplicações que necessitem de elevado desempenho (AZEVEDO, 2018).

Modelos de carros elétricos mais conhecidos que utilizam esse tipo de motor: Toyota Prius, Nissan Leaf, Kia Soul EV.

Figura 17 – Motor síncrono de ímã permanente



Fonte: NeoCharge (2020).

2.3.4 Motor de relutância comutada

Um motor de relutância comutada (SRM) funciona através da manipulação de forças eletromagnéticas. Estes motores consistem tipicamente de um rotor, que é tipicamente composto de ferro e eletromagnetos. Estes não são eletroímãs com coerência. Em vez disso, ligam e desligam para estabelecer polos no rotor ferromagnético. Este tipo de rotor permite o funcionamento a temperaturas elevadas. É uma vantagem em relação aos motores de ímãs permanentes, pois nesses, as altas temperaturas desmagnetizariam os ímãs (AZEVEDO, 2018).

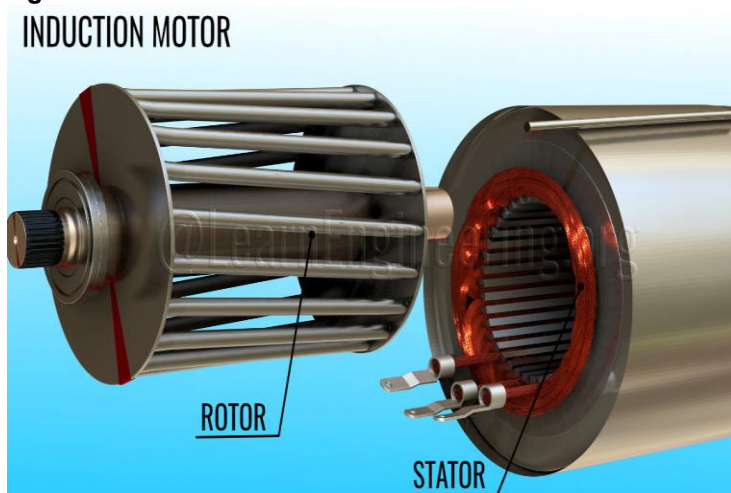
Este tipo de motor pode entregar uma potência alta a um baixo custo, deixando-o bastante atrativo para diversas aplicações. No entanto, alguns problemas associados a controle, fabricação e baixo fator de potência impedem que ele seja largamente utilizado para veículos elétricos (NEOCHARGE, 2020).

Modelos de carros elétricos mais conhecidos que utilizam esse tipo de motor: BMW i3.

2.3.5 Motor IPM-SynRM: motor de ímã permanente interno–síncrono de relutância

Os engenheiros da Tesla Motor fizeram uma escolha impressionante de design quando desenvolveram o Tesla Model 3. Eles abandonaram os motores de indução, apresentado na Figura 18, comumente utilizados e os substituíram por um novo tipo de motor, chamado de motor IPM-SynRM (GADDAM, 2021).

Figura 18 – Funcionamento do rotor e estator no motor de indução



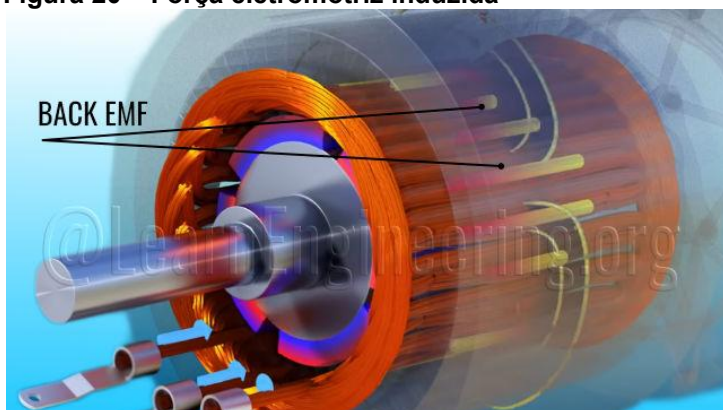
Fonte: Gaddam (2021).

O motor IPM-SynRM é uma combinação de motor de ímã permanente (IPM) com motor síncrono de relutância (SynRM). Os motores de ímã permanente funcionam com base na atração entre dois campos magnéticos (Figura 19). Eles produzem um bom torque de partida, mas apresentam um desempenho ruim quando o carro está em altas velocidades, devido a geração de força eletromotriz nas bobinas do estator (Figura 2). Outra desvantagem é que os ímãs resultam em perdas de correntes magnéticas, o que aumenta o calor no sistema (GADDAM, 2021).

Figura 19 – Funcionamento do motor de ímã permanente



Fonte: Gaddam (2021).

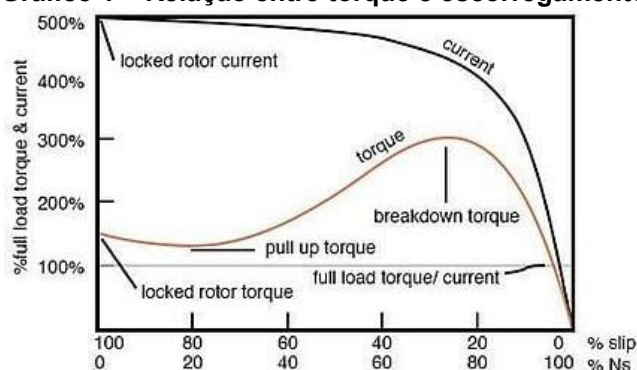
Figura 20 – Força eletromotriz induzida

Fonte: Gaddam (2021).

As bobinas de fio no estator são conectadas a uma corrente alternada, que cria um campo eletromagnético em torno das cargas móveis na bobina via Lei de Ampère. Essa corrente faz com que a direção do fluxo de corrente nas bobinas mude, mudando a orientação do campo eletromagnético do estator. Se projetada corretamente, a corrente variável pode criar um campo eletromagnético aparentemente “rotativo” através deste estator, que então interage com os enrolamentos no rotor. Em motores de indução, o campo eletromagnético rotativo do estator induz um campo oposto nos fios do rotor, fazendo-o girar, via Lei de Faraday e Lei de Lenz (CAVALLO, 2019).

O principal motivo que levou os engenheiros da Tesla a substituir o motor de indução comum pelo IPM-SynRM é a eficiência (Gráfico 1). Em aplicações automotivas, é necessário converter a energia CC da bateria em energia CA trifásica, o que ocorre por meio de um inversor DC para AC. Com motores de indução CA, deve-se considerar a velocidade do rotor em relação à frequência de entrada da energia CA, definido inicialmente pela chamada velocidade síncrona. Para um motor de indução CA de dois polos operando a 60 Hz, a velocidade síncrona do motor seria 3.600 RPM. No entanto, se o rotor estivesse girando a 3.600 RPM nesta configuração, você teria torque zero do motor. Idealmente, há algum deslizamento do rotor em relação à frequência, normalmente em torno de 5%. Como tal, esses motores são considerados motores assíncronos. A eficiência dos motores de indução trifásicos pode variar de 85% a 96% (HANEJKO, 2020).

Gráfico 1 – Relação entre torque e escorregamento em motores de indução CA

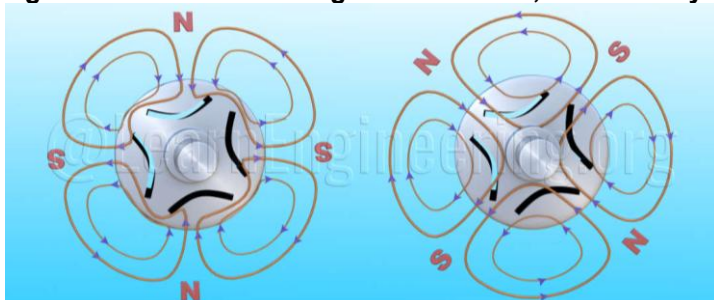


Fonte: Hanejko (2020).

Apesar disso, uma grande vantagem dos motores de indução CA para veículos elétricos é o custo, são relativamente baratos de construir. O design exclusivo do motor automotivo Tesla é mais caro. Não se sabe o preço exato, mas uma opção de tração nas quatro rodas para o Tesla adiciona cerca de US\$ 4.000 ao custo total do veículo (HANEJKO, 2020).

Para contornar os problemas relacionados, foi empregado fundamentos do motor síncrono de relutância (SynRM). Em operações de alta velocidade, os engenheiros da Tesla fizeram uso da propriedade de relutância do ferro, que oferece menos oposição aos campos magnéticos em relação ao ar. Assim, são geradas rotações contínuas que fazem o movimento do rotor, intensificados pelas suas ranhuras. As figuras abaixo ilustram estados de alta relutância e baixa relutância do rotor, respectivamente (GADDAM, 2021).

Figura 21 – Relutância magnética do rotor, no motor SynRM



Fonte: Gaddam (2021).

Normalmente, o rotor tende a um estado de baixa relutância. Portanto, se o campo magnético girar, o rotor girará simultaneamente. A velocidade de rotação será igual à velocidade do campo magnético rotativo. O torque produzido por esse fenômeno é conhecido como “torque de relutância”, razão pela qual tais motores recebem o nome de motores de relutância síncronos (GADDAM, 2021).

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

O objetivo desse trabalho é realizar um comparativo entre o veículo a combustão e o veículo elétrico a bateria considerando funcionalidade e sustentabilidade. Para o comparativo, foram escolhidos o Tesla Model 3, o veículo elétrico mais vendido mundialmente (pelo fato de que o mercado brasileiro para essa classe de veículos é ainda muito reduzido) e o Renault Sandero, que foi apontado como o 24º carro mais vendido no Brasil em 2020 (Tabela 1).

Tabela 1 – Ranking de vendas de veículos elétricos em 2020

Fabricante	Modelo	Quantidade de Veículos Vendidos em 2020
<i>Tesla</i>	<i>Model 3</i>	<i>365.000</i>
Wuling	Hongguang Mini EV	119.000
<i>Renault</i>	<i>Zoe</i>	<i>100.000</i>
Tesla	Model Y	80.000
Hyundai	Kona Electric	65.000
Volkswagen	ID.3	57.000
Nissan	Leaf	56.000
Audi	e-tron	48.000
SAIC	Baojun E-Series	48.000
Great Wall Motors	ORA R1	47.000

Fonte: Carlier (2021).

3.1 TESLA MODEL 3

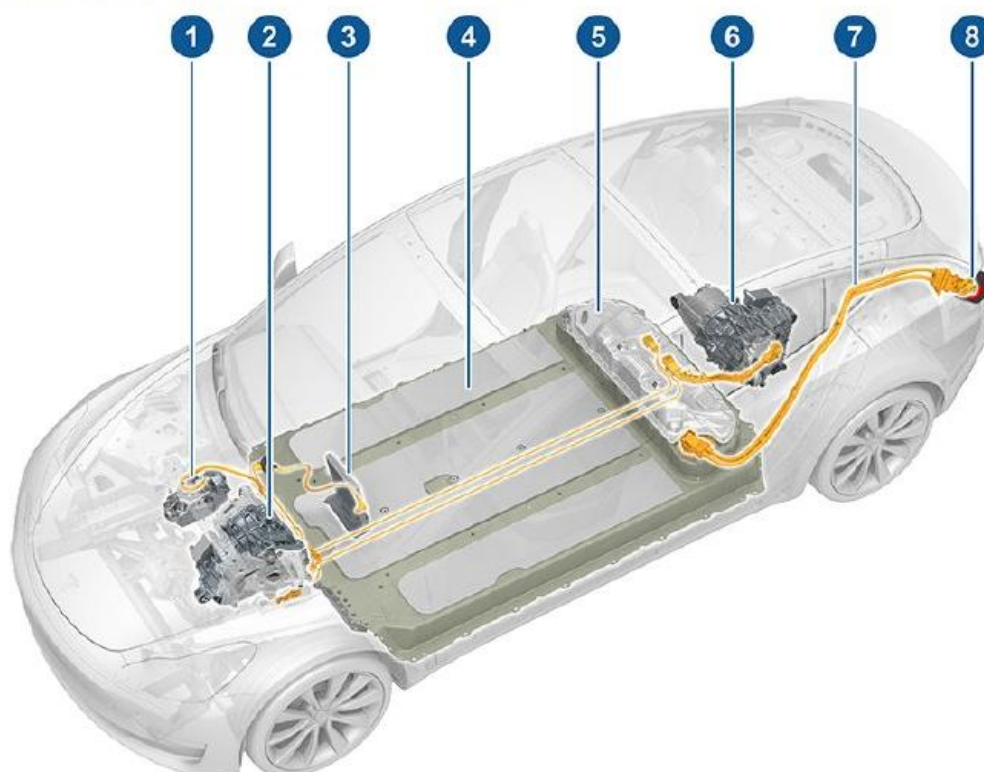
O Tesla Model 3, apresentado na Figura 22, foi comercializado como sendo mais acessível que os modelos anteriores da Tesla. Desde o início de 2020, é o carro elétrico mais vendido da história mundial, e, em julho de 2021, tornou-se o primeiro carro elétrico a ultrapassar a marca de 1 milhão de vendas globais. Esse modelo, com os componentes elétricos descritos na Figura 23, tem sido o carro elétrico plug-in (PEV) mais vendido do mundo por três anos consecutivos, de 2018 a 2020 (PONTES, 2021).

Figura 22 – Tesla Model 3 performance AWD 2019



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Principais componentes elétricos do Tesla Model 3
Principais componentes elétricos



1. Compressor do ar condicionado
2. Motor frontal
3. Aquecedor de cabine
4. Bateria de alta tensão
5. Painel de serviço da bateria de alta tensão
6. Motor traseiro
7. Cabeamento de alta tensão
8. Porta de carga

Fonte: Loveday (2017).

Atualmente, esse sedã elétrico de quatro portas está sendo comercializado em 3 versões, sendo elas: Standard Range Plus RWD, Long Range AWD e Long Range AWD Performance. A principal diferença entre elas é o alcance, ou seja, a distância que o veículo é capaz de percorrer antes de precisar recarregar sua bateria. A Tabela 2, apresenta que a versão Standard Range Plus oferece uma autonomia testada pela EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos) de 422 km, enquanto a versão Long Range AWD apresenta 568 km e a Long Range AWD Performance 507 km. Esse modelo possui hardware totalmente autônomo, com atualizações periódicas de software que adicionam funcionalidades.

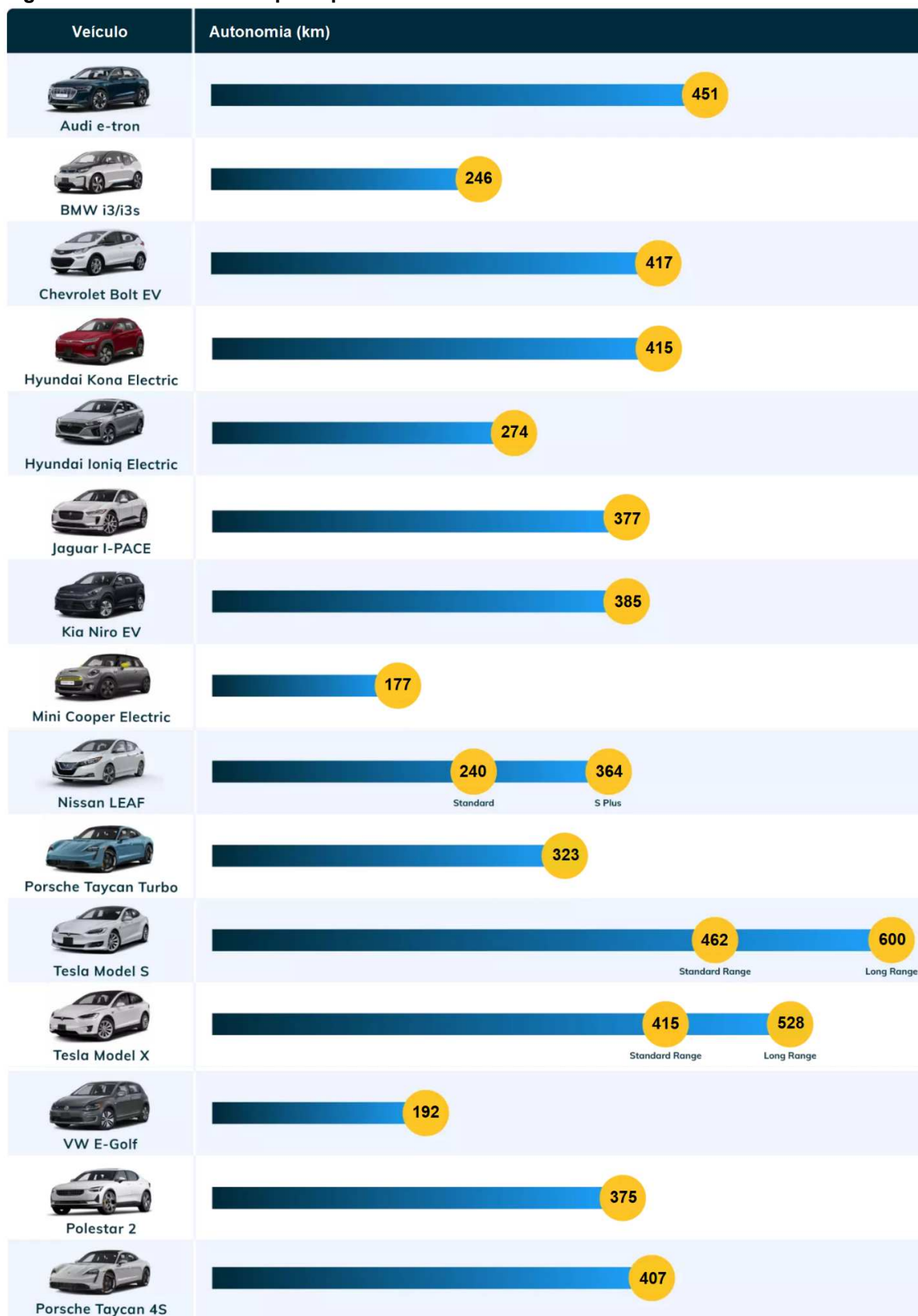
Tabela 2 – Características do Tesla Model 3

Bateria	Standard Range Plus	Long Range	
	RWD	AWD	AWD Performance
Sistema de Tração	Tração de roda traseira com um único motor	Tração nas quatro rodas com motor duplo	
Produção	03/2019 - Presente	07/2019 - Presente	
Preço Base (EUA)	US\$ 43.990	US\$ 49.990	US\$ 57.990
Autonomia	423 km	568 km	507 km
Eficiência	15 kWh/100 km	18 kWh/100 km	
Capacidade da Bateria	54 kWh	82 kWh	
Carregamento DC	Até 170 kW (V3 Supercharger)	Até 250 kW (V3 Supercharger)	
Carregamento AC	51 km de alcance por hora (240V 32A)	63.9 km de alcance por hora (240V 48A)	
Tempo de carregamento AC (10% a 90%)	6.25 horas	6.5 horas	
Motor	Motor síncrono de ímã permanente interno (IPM)	Traseira síncrona do motor	
Peso	1.645 kg	1.847 kg	
Potência Máxima	211 kW	258 kW	340 kW
Torque Máximo	450 Nm	510 Nm	639 Nm
Aceleração	0 – 100 km/h: 5,6 s	0 – 100 km/h: 4,4 s	0 – 100 km/h: 3,3 s
Velocidade Máxima	225 km/h	233 km/h	261 km/h

Fonte: Autoria própria.

Para efeito de comparação, a figura abaixo indica autonomia dos principais veículos elétricos comercializados atualmente.

Figura 24 – Autonomia dos principais veículos elétricos a bateria comercializados atualmente



Fonte: EVgo (2020).

A Tabela 3, indica os tempos estimados para carregamento do Tesla Model 3 considerando diferentes métodos e potências. Para o carregamento rápido, foi considerado apenas entre os níveis de 20% a 80%, que é a faixa segura para esse método (o carregamento rápido pode comprometer a saúde da bateria).

Tabela 3 – Tempo de carregamento do Tesla Model 3

Método de Carregamento	Local Típico	Tempo Requerido	Alcance / hora
0 - 100%			
Tomada comum	Casa	24 - 36 h	9 - 10 m/h
3.6 kW	Casa, Trabalho	15 - 22 h	14 - 17 m/h
7 kW	Casa, Trabalho, Locais Públicos	8 - 12 h	27 - 32 m/h
22 kW	Trabalho, Locais Públicos	5 - 8 h	42 - 50 m/h
20 – 8			
50 kW	Locais Públicos	40 - 60 min	96 - 113 m / 30 min
150 kW	Locais Públicos	20 - 20 min	288 - 339 m / 30 min

Fonte: Podpoint (2021).

3.2 RENAULT SANDERO

No caso do Renault Sandero, apresentado na Figura 25, considera-se a versão Authentique e serão utilizados dados levantados por Ana Carolina Fabricio da Rocha Santos em sua monografia “Análise da Viabilidade Técnica e Econômica de um Veículo Elétrico Versus Veículo a Combustão”.

Figura 25 – Renault Sandero Authentique



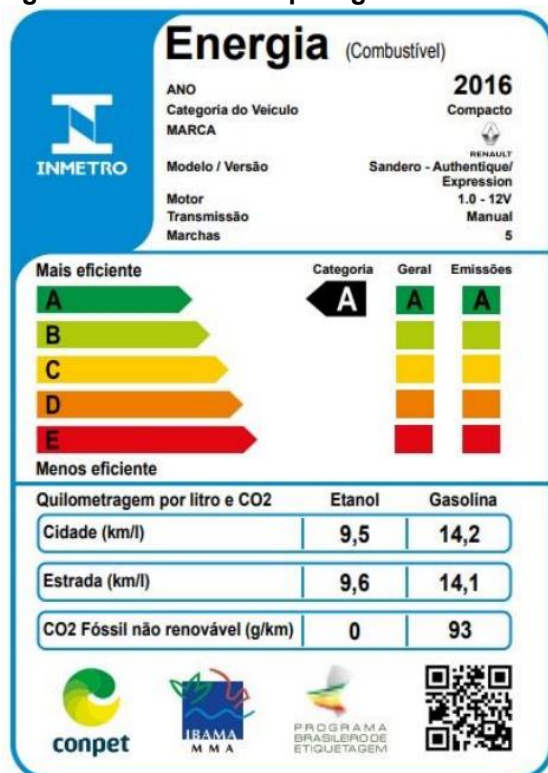
Fonte: Autoria própria.

O modelo Authentique utiliza um motor de combustão interna quatro tempos, bicomcombustível (flex) que pode ser abastecido com gasolina e/ou etanol. O motor é o 1. SCe (*Smart Control Efficiency*), de 3 cilindros e 12 válvulas. Segundo a fabricante, o motor SCe é um dos mais econômicos do país, com um ganho significativo em performance e uma redução de até 19% no consumo de combustível. Seu tanque de combustível comporta 50 l.

Possui uma performance de 82 cv com etanol e 79 cv com gasolina. Apresenta um torque máximo de 10,5 kgfm (3500 rpm) com etanol e 10,2 kgfm (3500 rpm) com gasolina e uma cilindrada de 999 cm³. Atinge uma velocidade máxima de 163 km/h com etanol e 160 km/h com gasolina. Possui uma aceleração de 0 a 100 km/h de 13 segundos com álcool e 13,1 segundos com gasolina.

No que diz respeito à eficiência, o Renault Sandero está classificado na categoria A, segundo selo de etiquetagem do INMETRO, apresentado na Figura 26, categoria mais eficiente. O carro faz 9,5 km/l com etanol e 14,2 km/l com gasolina na cidade, e 9,6 km/l com etanol e 14,1 km/l na estrada. A emissão de CO₂ proveniente do combustível fóssil não renovável é de 93 g/km. Essas informações podem ser vistas na figura abaixo.

Figura 26 – Selo de etiquetagem do INMETRO para o Renault Sandero



Fonte: Autoria própria.

3.3 ANÁLISE TÉCNICA E AMBIENTAL

O Quadro 1 traz as principais características dos veículos considerados para esse estudo. Entre as principais discrepâncias observadas estão a potência: 211 kW (283 cv) para o veículo elétrico e 58 kW (79 cv) para o veículo a combustão; e a autonomia: 423 km para o veículo elétrico e 710 km para o veículo a combustão. Foram considerados preços de gasolina e etanol registrados em Curitiba, no dia 09/11/2021, conforme reportagem divulgada no site da Paraná Portal.

Quadro 1 – Especificações dos veículos Tesla Model 3 e Renault Sandero

	Veículo Elétrico Tesla Model 3	Veículo a Combustão Renault Sandero
Segmento	Compacto	Compacto
Capacidade	5 pessoas	5 pessoas
Peso	1645 kg	1011 kg
Comprimento	4690 mm	4060 mm
Entre eixos	2880 mm	2590 mm
Largura	1930 mm	1733 mm
Altura	1440 mm	1536 mm
Motorização	Motor elétrico a bateria	Motor de combustão interna 4 tempos, 1.0, 3 cilindros, 12V
Combustível	-	Gasolina ou etanol
Potência	211 kW (283 cv)	58 kW (79 cv)
Torque máximo	450 Nm	100 Nm
Aceleração de 0 a 100 km/h	5,6 s	13,1 s
Velocidade máxima	225 km/h	160 km/h
Consumo	150 Wh/km	14,2 km/l (gasolina) 9,5 km/l (etanol)
Autonomia	423 km	710 km
Valor do km rodado	R\$ 0,08 (R\$ 0,513/kWh)	R\$ 0,44 Gasolina: R\$ 6,27/l
		R\$ 0,56 Etanol: R\$ 5,34/l

Fonte: Autoria própria.

A diferença fundamental entre essas classes de veículo, está relacionada ao processo de transformação da energia potencial (armazenada) em energia cinética (movimento). Nos carros térmicos, essa energia é armazenada na forma química e liberada por meio de uma reação química dentro do motor.

Por outro lado, apesar de também possuírem energia armazenada quimicamente, os carros elétricos a liberam eletroquimicamente sem qualquer tipo de combustão, graças às baterias de íon-lítio. Isso significa que não há queima de combustível e, portanto, não ocorre poluição do ar por meio do CO₂ durante a condução. Por outro lado, o Renault Sandero emite 93 g de CO₂ a cada km rodado, dado levantado pelo INMETRO.

Além disso, um estudo elaborado pela Cetesb (Agência Ambiental Paulista) constatou que os carros rodam uma média de 41 km todos os dias na capital paulista, o equivalente a 1.250 km/mês ou 15.000 km/ano (DESTAK JORNAL, 2014). No Quadro 2, é possível comparar as emissões de CO₂ em diferentes períodos.

Quadro 2 – Emissões de dióxido de carbono dos veículos Tesla Model 3 e Renault Sandero

Emissões de CO ₂	Veículo Elétrico Tesla Model 3	Veículo a Combustão Renault Sandero
Por quilômetro (km)	0 g/km	93 g/km
Por dia (41 km)		3,81 kg/dia
Por mês (1.250 km)		116,25 kg/mês
Por ano (15.000 km)		1350 kg/ano

Fonte: Autoria própria.

Porém, os veículos elétricos apresentam outros impactos ambientais, principalmente quanto à reciclagem das baterias de íon-lítio. Enquanto 99% das baterias tradicionais de chumbo-ácido são recicladas, a taxa de reciclagem das baterias de íon-lítio ainda é de aproximadamente 5%. As baterias desse tipo são maiores, mais pesadas e compostas por centenas de células individuais de íon-lítio, as quais precisam ser desmontadas individualmente. Elas contêm materiais perigosos e podem explodir caso sejam desmontadas incorretamente.

Países da União Europeia estudam medidas para obrigar os fornecedores desse tipo de veículo que seus produtos não sejam simplesmente descartados no fim de sua vida útil.

A Nissan, por exemplo, agora está reutilizando baterias usadas de seus carros Leaf nos veículos automatizados que entregam peças aos trabalhadores em suas fábricas.

A Volkswagen está fazendo o mesmo, mas também abriu recentemente sua primeira fábrica de reciclagem, em Salzgitter, Alemanha, e planeja reciclar até 3.600 sistemas de bateria por ano durante a fase piloto.

A Renault, por sua vez, agora está reciclando todas as baterias de seus carros elétricos. Ela faz isso por meio de um consórcio com a empresa francesa de gestão de resíduos Veolia e a empresa química belga Solvay.

Outro ponto que deve ser abordado é a extração das matérias-primas necessárias para a fabricação das baterias de íon-lítio, como cobalto, lítio e elementos de terras raras - que têm sido associadas a graves preocupações ambientais e de direitos humanos.

Pesquisadores alertam sobre o cobalto, o material mais valioso das baterias dos veículos elétricos atuais. A mineração desse metal produz resíduos perigosos que podem contaminar o meio ambiente, além de que estudos recentes constataram alta exposição em comunidades próximas aos locais de extração, especialmente entre crianças. Extrair o metal de seu minério requer um processo de fundição, que pode emitir óxido de enxofre e outros poluentes atmosféricos tóxicos. Segundo reportagem do jornal *The Guardian*, aproximadamente 70% do suprimento mundial desse material é extraído na República Democrática do Congo, uma quantidade substancial em minas não regulamentadas onde os trabalhadores extraem o metal da terra usando apenas ferramentas manuais gerando grande risco a sua saúde e segurança.

O lítio normalmente é extraído da Austrália ou de planícies salgadas nas regiões andinas da Argentina, Bolívia e Chile, operações que usam grandes quantidades de água subterrânea para bombear as salmouras, puxando a água disponível para fazendeiros indígenas e pastores. A água necessária para a produção de baterias significa que a fabricação de veículos elétricos consome cerca de 50% mais água do que os motores tradicionais de combustão interna. Os depósitos de terras raras, concentrados na China, geralmente contêm substâncias radioativas.

4 CONCLUSÃO

A tecnologia do veículo elétrico começou a ser desenvolvida no século XIX e competiu com veículos movidos a vapor e a combustão interna. A partir do século XX, os veículos de combustão interna ganharam muita força e se tornaram praticamente um monopólio, juntamente com os ativos complementares que integram a infraestrutura do abastecimento do petróleo. No entanto, o aumento exponencial da quantidade de veículos movidos a combustíveis fósseis em circulação e os impactos ambientais decorrentes (especialmente o aquecimento global) fomenta o ressurgimento do carro elétrico.

É notável o crescimento dessa indústria, principalmente nos países desenvolvidos da América do Norte, Ásia e Europa. Além de serem silenciosos, potentes e possuírem uma boa autonomia, surgem como uma oportunidade para reduzir as emissões de gases do efeito estufa, melhorar a qualidade do ar e reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. A adoção desses veículos com certeza traria muitos benefícios para a sociedade em diferentes escalas.

O Brasil e os demais países, infelizmente, ainda não possuem a infraestrutura necessária para suportar uma grande quantidade de veículos elétricos. Porém, trata-se de um processo a ser desenvolvido no decorrer do tempo, semelhante ao que ocorreu com os veículos a combustão interna e com os postos de combustível. No caso do Brasil, o futuro da mobilidade elétrica seria muito beneficiado pelas Fontes renováveis de energia, como os recursos hídricos, sol abundante e ventos contínuos em várias localidades.

Porém, como a maioria das tecnologias inovadoras, ainda há muitas questões a serem estudadas. Como sugestão de trabalhos futuros, é interessante analisar o processo de reciclagem das baterias de íon-lítio e possíveis medidas que devem ser tomadas para estimulá-lo, visto que é um dos componentes principais dessa classe de veículo. Além disso, estudar o processo de extração dos materiais necessários para sua fabricação de forma a minimizar os impactos ambientais e ainda, verificar se há matéria-prima suficiente para fabricação em escala global ou se deverá ser implementando o modelo de carro compartilhado.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Marcelo Henrique de. Carros elétricos: viabilidade econômica e ambiental de inserção competitiva no mercado brasileiro. 2018. 54 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: <<http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1579>>. Acesso em: 9 nov. 2021.

BARAN, Renato. **A Introdução de Veículos Elétricos no Brasil: Avaliação no Impacto no Consumo de Gasolina e Eletricidade**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

CARRIER, Mathilde. **Global Sales of Battery-Electric Vehicles 2021**. statista, publicado em: 2 set. 2021. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/1059214/global-battery-electric-vehicle-sales/>>. Acesso em: 9 nov. 2021.

CAVALLO, Christian. **All About Induction Motors - What They Are and How They Work**. Copyright© 2021 Thomas Publishing Company, publicado em: 16 ago. 2019. Disponível em: <<https://www.thomasnet.com/articles/machinery-tools-supplies/all-about-induction-motors-what-they-are-and-how-they-work/>>. Acesso em: 9 nov. 2021.

ENGELMANN, Richard H. **Handbook of Electric Motors**. CRC Press, 1994.

EVGO. **Types of Electric Vehicles: A brief overview of EV options**. Copyright© 2021 EVgo Services LLC, publicado em: 25 mar. 2020. Disponível em: <<https://www.evgo.com/ev-drivers/types-of-evs/>>. Acesso em: 24 set. 2021.

GADDAM, Yogeshware S. **Tesla Model 3's IPM-SynRM Electric Motor**. Copyright ©2021 Lesics Engineers Pvt.Ltd., publicado em: 8 jan. 2021. Disponível em: <<https://www.lesics.com/tesla-model-3%27s-ipm-synrm-electric-motor.html>>. Acesso em: 31 out. 2021.

GERSSSEN-GONDELACH Sarah J; FAAIJ, André P. C. **Performance of batteries for electric vehicles on short and longer term**. Journal of Power Sources, n. 212, 2012, p. 111-129. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.03.085>>. Acesso em: 31 out. 2021.

HANEJKO, Fran. **Induction vs. Permanent Magnet Motor Efficiency**. Copyright© 2018 Horizon Technology Inc., publicado em: 23 abr. 2020. Disponível em: <<https://www.horizontechnology.biz/blog/induction-vs-permanent-magnet-motor-efficiency-auto-electrification>>. Acesso em: 1 nov. 2021.

HURLEY, Selina. **The Surprisingly Old Story of London's First Ever Electric Taxi**. Science Museum Blog, publicado em: 9 jul. 2012. Disponível em: <<https://blog.sciencemuseum.org.uk/the-surprisingly-old-story-of-londons-first-ever-electric-taxi/>>. Acesso em: 28 set. 2021.

KARTHIK, Sri H. **Types of Motors used in Electric Vehicles**. CircuitDigest, publicado em: 3 mai. 2019. Disponível em: <<https://circuitdigest.com/article/different-types-of-motors-used-in-electric-vehicles-ev>>. Acesso em: 28 out. 2021.

LOVEDAY, Eric. **Tesla Model 3 Owners Manual**. Publicado em: 24 nov. 2017. Disponível em: <<https://insideevs.com/news/336899/tesla-model-3-owners-manual-hits-internet-in-pdf-form-here-are-all-160-pages/>>. Acesso em: 4 nov. 2021.

MANZ, V. Christian. **Stratingh & Becker Electric Vehicle from 1835**. Prestige Electric Car, Publicado em: 15 dez. 2017. Disponível em: <https://www.prestigeelectriccar.com/en/news/2294/Stratingh__Becker_electric_vehicle_from_1835>. Acesso em: 22 out. 2021.

MARTINS, Claudia do Nascimento. **Condicionantes da Difusão do Carro Elétrico no Brasil: Análise dos Fatores Institucionais, Econômicos e Técnicos**. Rio de Janeiro: 2015. Disponível em: <<https://www.ie.ufrj.br/images/IE/PPED/Teses/2015/Claudia%20do%20Nascimento%20Martins.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2021.

MATULKA, Rebecca. **The History of the Electric Car**. Energi.gov, Departamento de Energia. Publicado em: 15 set. 2014. Disponível em: <<https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>>. Acesso em: 11 set. 2021.

MORIMOTO, M. **Which is the First Electric Vehicle?** Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi), v. 192, n. 2, p. 31–38, 1 jul. 2015.

NABEEL, K. **Flocken, the First Electric Car From 1988**. Copyright© WheelsJoint, publicado em: 1 jul. 2020. Disponível em: <<https://www.wheelsjoint.com/flocken-the-first-electric-car-from-1988/>>. Acesso em: 24 set. 2021.

NEOCHARGE. **Como Funciona o Motor de um Carro Elétrico**. Copyright© NeoCharge, publicado em: 28 jan. 2020. Disponível em: <<https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/motor-como-funciona>>. Acesso em: 29 out. 2021.

PONTES, José. **Global Top 20 - December 2020**. EV Sales, publicado em: 2 fev. 2021. Disponível em: <<http://ev-sales.blogspot.com/2021/02/global-top-20-december-2020.html>>. Acesso em: 24 set. 2021.

POPE, Franklin L. **The Inventions of Thomas Davenport**. Originally published in Transactions of the AIEE, volume VIII, 1891. Página foi modificada pela última vez em 12 de maio de 2021. Disponível em: <https://ethw.org/Archives:The_Inventions_of_Thomas_Davenport>. Acesso em: 22 nov. 2021.

PORTESCAP. **Por Que Usar um Motor CC com Escovas**. Copyright 2021© Portescap, publicado em: 5 ago. 2014. Disponível em: <<https://www.portescap.com/pt-br/motores-dc/motores-dc-com-escovas/brushed-dc-motor-basics>>. Acesso em: 6 nov. 2021.

PURDY, Ken W.; FOSTER, Christopher G. **History of the Automobile**. Encyclopedia Britannica, publicado em: 22 fev. 2007. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/automobile/History-of-the-automobile>>. Acesso em: 29 set. 2021.

RICHARD, Schallenberg H. **Camille Faure Creates Lead-Acid Batteries in 1881**. UPS Battery Center, publicado em: 11 jun. 2018a. Disponível em: <<https://www.upsbatterycenter.com/blog/camille-faure-lead-acid-1881/>>. Acesso em: 16 set. 2021.

RICHARD, Schallenberg H. **Gustave Trouve Pioneers Electric Transport in 1881**. UPS Battery Center, publicado em: 11 jun. 2018b. Disponível em: <<https://www.upsbatterycenter.com/blog/gustave-trouve-electric-tricycle/>>. Acesso em: 17 set. 2021.

RICHARD, Schallenberg H. **The Ayrton and Perry Electric Tricycle of 1881**. UPS Battery Center, publicado em: 22 jun. 2018c. Disponível em: <<https://www.upsbatterycenter.com/blog/ayrton-and-perry-electric-tricycle/#prettyPhoto>>. Acesso em: 17 set. 2021.

PODPINT. **Tesla Model 3 (2021)**. Copyright 2021© Pod Point, publicado em: 3 jun. 2021. Disponível em: <<https://pod-point.com/guides/vehicles/tesla/2021/model-3>>. Acesso em: 1 nov. 2021.