



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ – UFC**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA – CT**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – DEE**

**MARIA ANNALYANNE PEREIRA DA SILVA**

**PRINCIPAIS TENDÊNCIAS E DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE VEÍCULOS  
ELÉTRICOS NO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS**

**FORTALEZA**

**2022**

MARIA ANNALYANNE PEREIRA DA SILVA

**PRINCIPAIS TENDÊNCIAS E DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE VEÍCULOS  
ELÉTRICOS NO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará – UFC, como parte dos requisitos obrigatórios para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Domenico Sgrò

**FORTALEZA**

**2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- S581p Silva, Maria Annalyanne Pereira da.  
Principais tendências e desafios na implementação de veículos elétricos no setor de transporte rodoviário de cargas / Maria Annalyanne Pereira da Silva. – 2022.  
77 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Domenico Sgrò.
1. Eletrificação. 2. Transporte de cargas. 3. Carregamento indutivo. 4. Carregamento plug-in. 5. Carregamento condutivo por catenárias aérea. I. Título.

CDD 621.3

---

MARIA ANNALYANNE PEREIRA DA SILVA

**PRINCIPAIS TENDÊNCIAS E DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE VEÍCULOS  
ELÉTRICOS NO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará – UFC, como parte dos requisitos obrigatórios para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Domenico Sgrò

Fortaleza, 20 de dezembro de 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Domenico Sgrò

Orientador

DEE/UFC

---

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques de Carvalho

Examinador

DEE/UFC

---

Prof<sup>ª</sup>. Dra. Ruth Pastora Saraiva Leão

Examinador

DEE/UFC

*“Não é o crítico que importa; nem aquele que aponta onde foi que o homem tropeçou ou como o autor das façanhas poderia ter feito melhor. O crédito pertence ao homem que está por inteiro na arena da vida, cujo rosto está manchado de poeira, suor e sangue; que luta bravamente; que erra, que decepciona, porque não há esforço sem erros e decepções; mas que, na verdade, se empenha em seus feitos; que conhece o entusiasmo, as grandes paixões; que se entrega a uma causa digna; que, na melhor das hipóteses, conhece no final o triunfo da grande conquista e que, na pior, se fracassar, ao menos fracassa ousando grandemente.”*

*Theodore Roosevelt*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que em toda Sua bondade e plenitude, sempre é presente e influente nos rumos que são direcionados para a minha vida. Por todo Seu acolhimento e conforto em todas as horas que necessito.

À minha mãe, Maria do Céu, e ao meu pai, Antonio (*in memorian*), por toda dedicação e empenho dados a minha educação e formação, vocês são os maiores responsáveis por terem proporcionado todo apoio e suporte que precisei para chegar até aqui.

Aos meus avós (*in memorian*), pelos ensinamentos que recebi ainda pequena e pelas memórias que guardo com muito amor e carinho de vocês.

Ao meu professor orientador, Prof. Dr. Domenico Sgrò, obrigada por me auxiliar durante a minha formação e pela oportunidade de realizar esse trabalho sob sua orientação. Assim como também a banca de avaliação, composta pelo Prof. Dr. Paulo Carvalho e pela Prof<sup>ª</sup>. Dra. Ruth Leão, obrigada pela contribuição com o trabalho e pelo tempo dedicado em minha formação profissional.

Aos meus grandes e maiores amigos Andrew, Everton e Matheus, que mesmo trilhando caminhos distintos se fazem presentes em minha vida. Em especial, à minha melhor amiga e irmã de jornada, Nayla Oliveira, que mesmo na distância se faz presente em minha vida, por todo o seu apoio e pela saudade constante que faz em minha rotina.

Aos amigos que a universidade me trouxe Alice F., Bruno M., Bruno W., Carolina, Davi, Gustavo, Lorena Marques, Messias G., Nathanael, Raul e Yana, obrigada pelos ensinamentos, pelo ombro amigo e por terem dividido essa jornada comigo, espero que sigamos juntos para a vida.

À Tecsys e a todos os empresários juniores, que me proporcionaram aprendizagem, conhecimentos e experiências que levarei para sempre em minha vida.

A todos os colegas do meu estágio na Enel Brasil, em especial as minhas primeiras gestoras Ângela Corso e Ana Clara Cardoso, pelos ensinamentos profissionais e de vida, por todo apoio que forneceram para minha carreira profissional, por todas as oportunidades e confiança dadas a mim, para sempre serei grata a vocês e as terei como exemplo de profissional que pretendo seguir.

## RESUMO

O transporte de cargas é atualmente responsável por cerca de 18% da demanda de petróleo mundial, além de também representar cerca de 23% das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) para atmosfera terrestre, contribuindo para o aumento da temperatura do planeta. A eletrificação do setor de transporte de cargas por meio da implementação de caminhões elétricos e da construção de infraestrutura de abastecimento elétrico nas rodovias, tornou-se uma possível solução para garantir maior sustentabilidade no exercício da atividade de distribuição de mercadorias. No entanto, a descarbonização do transporte rodoviário ainda enfrenta limitações ligadas a logística, altos custos e baixa escalabilidade das tecnologias. Nesse contexto, este trabalho busca avaliar, por meio de revisão bibliográfica, as principais tendências desenvolvidas, bem como os principais desafios ligados às principais tecnologias disponíveis para eletrificação do setor: carregamento condutivo *plug-in* e condutivo por catenária aérea; e carregamento indutivo. O carregamento *plug-in* aparece como uma tecnologia voltada principalmente para distribuição em curtas distâncias, devido à limitação de autonomia dos veículos; já o carregamento indutivo e o carregamento condutivo por catenária aérea aparecem como as principais soluções disponíveis no mercado atual para transporte de cargas de longo curso, sendo que ambas as tecnologias apresentam alto custo de investimento, podendo o custo de infraestrutura do carregamento indutivo custar até cinco vezes mais do que o sistema de catenárias aéreas, uma vez que o sistema indutivo pode custar em média US\$ 4.938.000 por quilômetro de rodovia e o sistema de catenárias pode custar US\$ 900.000 por quilômetro de rodovia. Destaca-se também que todas as tecnologias já possuem modelos de testes implementados no mundo, sendo possível identificar os desafios técnicos e de infraestrutura associadas a cada solução como eficiência na transferência de energia e desgaste de material. O modelo de catenárias aéreas se encontra mais direcionado para o setor de transporte de cargas e é o mais consolidado no mercado até o momento.

**Palavras-chave:** Eletrificação; Transporte de cargas; Carregamento indutivo; Carregamento *plug-in*; Carregamento condutivo por catenárias aéreas.

## ABSTRACT

The road freight transportation is currently responsible for about 18% of the world's oil demand, besides also representing about 23% of Greenhouse Gases (GHG) emissions into the Earth's atmosphere, contributing the increase of the planet's temperature. The electrification of the sector through the implementation of electric trucks and the construction of electric supply infrastructure on the highways, has become a viable and effective solution to ensure greater sustainability in the exercise of the activity of distribution of goods. However, the decarbonization of road transportation still faces logistics problems, high costs, and low scalability of technologies. In this context, this paper seeks to evaluate, through literature review, the main trends developed, as well as the main challenges related to the main technologies available for electrification of the sector of road freight transportation: conductive plug-in charging and conductive overhead charging by catenary; and inductive charging. Plug-in charging appears as a technology designed mainly for short distance distribution, due to the limited autonomy of the vehicles. Inductive charging and conductive overhead by catenary charging appears as the main solutions available in the current market for long distance freight transportation, and both technologies have high investment costs, with the cost of inductive charging infrastructure costing up to five times more than the overhead catenary system, since the inductive system can cost on average of US\$ 4,938,000 per kilometer of highway and the catenary system can cost US\$ 900,000 per kilometer of highway. It is also noteworthy that all technologies already have test models implemented worldwide, where it becomes possible to identify the technical and the infrastructure challenges associated with each solution such as energy transfer efficiency and material wear. The overhead catenary model is more geared towards the freight transport sector and is the most consolidated in the market so far.

**Keywords:** Electrification; Freight transportation; Inductive charging; Plug-in charging; Conductive charging by overhead contact lines.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quantitativo de artigos visitados.....	19
Figura 2 - Contribuição do biodiesel na redução dos gases de efeito estufa.....	24
Figura 3 - Comparação de volume e alcance.....	27
Figura 4 - O primeiro trólebus do mundo.....	28
Figura 5 - Trólebus na inauguração da primeira linha em São Paulo.....	29
Figura 6 - Modelo de sistema de distribuição elétrico com estações de recarga.....	31
Figura 7 - Modelo do caminhão elétrico iEV1200T.....	33
Figura 8 - Modelos e-Delivery 11 e 14 .....	34
Figura 9 - Estrutura simplificada do sistema WPT.....	36
Figura 10 - Carregamento sem fio estacionário.....	37
Figura 11 - Carregamento sem fio dinâmico .....	38
Figura 12 - Transferência de energia indutiva tradicional.....	42
Figura 13 - Transferência de energia indutiva por ressonância magnética acoplada .....	42
Figura 14 - Transferência de energia sem fio por ressonância magnética fortemente acoplada .....	42
Figura 15 - Carregamento sem fio estacionário da Evatran .....	44
Figura 16 - Dinâmica de via com carregamento indutivo dinâmico .....	46
Figura 17 - Vista superior das configurações de trilho do tipo “W” e do tipo “I” .....	47
Figura 18 - Ônibus e carregador elétrico da WAVE .....	48
Figura 19 - Teste do sistema da Bombardier em caminhão da Scania .....	49
Figura 20 - Trilha de ferrite do sistema OLEV embutida na estrada .....	49
Figura 21 - Construção e operação do sistema de carregamento indutivo dos ônibus OLEV .	50
Figura 22 - Ilustração de blindagem passiva aplicada ao ônibus OLEV.....	51
Figura 23 - Modelo implementado para testes da FABRIC .....	51
Figura 24 - Carregamento estático HaloIPT .....	52
Figura 25 - Caminhão Scania equipado com tecnologia da Siemens em rodovia da Alemanha .....	56
Figura 26 - Subestação de tração.....	57
Figura 27 - Estrutura de uma subestação DC para sistemas de catenária.....	59
Figura 28 - eHighway do projeto ELISA .....	63
Figura 29 - Projeto eHighway na Suécia .....	64
Figura 30 – Representatividade do transporte de cargas no Brasil por setor .....	66

Figura 31 - Demanda Energética Total do Transporte de Cargas .....	67
Figura 32 - Consumo energético no transporte de carga, por modo, no Brasil .....	68
Figura 33 - Consumo de energia total do Brasil (GWh).....	69
Figura 34 - Top 10 países emissores de GEE.....	70

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Resumo das atualizações do sistema de distribuição de eletricidade para carregamento de veículos elétricos plug-in .....	35
Tabela 2 - Classificação e comparação de diferentes tecnologias WPT para carregamento de veículos elétricos .....	40

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

CaC	Células a Combustível
COP	Conferências das Partes
CPT	<i>Capacitive Power Transfer</i>
DWC	<i>Dynamic Wireless Charging</i>
EISA	<i>Energy Independence and Security Act</i>
FGV	Fundação Getúlio Vargas
GEE	Gases de Efeito Estufa
GN	Gás Natural
IPT	<i>Inductive Power Transfer</i>
OLEV	<i>Online Electric Vehicles</i>
OLPT	<i>On-line Inductive Power Transfer</i>
ONU	Organizao das Nações Unidas
PEMFC	<i>Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells</i>
PMPT	<i>Permanent Magnet Coupling Transfer</i>
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
QDWC	<i>Quasi-Dynamic/stationary Wireless Charging</i>
RAPT	<i>Resonant Antennae Power Transfer</i>
RFS	<i>Renewable Fuel Standard</i>
RIPT	<i>Resonant Inductive Power Transfer</i>
SOFC	<i>Solid Oxide Fuel Cell</i>
SWC	<i>Stationary Wireless Charging</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
VE	Veículos Elétricos

WPT

*Wireless Power Transfer*

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1	Objetivos .....	17
1.1.1	Objetivo Geral .....	17
1.1.2	Objetivos Específicos .....	17
1.2	Metodologia .....	18
1.3	Estrutura do Trabalho .....	19
<b>2</b>	<b>COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS</b> .....	21
2.1	Hidrogênio .....	21
2.2	Biocombustíveis.....	23
2.3	Gás natural .....	25
<b>3</b>	<b>ELETRIFICAÇÃO</b> .....	28
3.1	Carregamento condutivo <i>plug-in</i> .....	30
3.1.1	Status atual.....	32
3.1.2	Custos.....	34
3.2	Transferência de energia sem fio – <i>Wireless Power Transfer (WPT)</i> .....	35
3.2.1	Transferência indutiva de carga – <i>The Inductive Power Transfer (IPT)</i> .....	41
3.3	Carregamento condutivo a catenária.....	55
3.3.1	<i>eHIGHWAY</i> : O Sistema Siemens .....	56
3.3.2	Status Atual .....	61
3.3.3	Custo .....	64
3.3.4	Desafios .....	65
3.4	Verificação da carga adicional no sistema elétrico .....	65
3.5	Impactos nas reduções das emissões de GEE.....	69
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	71
4.1	TRABALHOS FUTUROS .....	72
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	73

## 1 INTRODUÇÃO

Em 1972, a Organização das Nações Unidas (ONU) organizou a primeira Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável realizada em Estocolmo na Suécia. A conferência contou com a participação de 113 países e representou o primeiro passo na busca para examinar e solucionar os problemas ambientais que já surgiam na época como as mudanças climáticas, o desaparecimento de territórios selvagens, a qualidade da água, entre outros.

Durante a realização da segunda Conferência das Nações Unidas, mais conhecida como Rio-92, foi aberta a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, conforme conhecida pela sigla em inglês UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) ou Convenção do Clima que, desde 1995, vem realizando encontros anuais, denominados de Conferências das Partes (COP), para discussão e tomadas de decisões para cumprimento das metas de combate às mudanças climáticas (FREITAS e SILVA, 2020).

No ano de 1997, foi realizada em Quioto, no Japão, uma das mais importantes Conferências das Partes, a COP 3, que contou com a participação de mais de 160 países. A COP 3 resultou na elaboração do chamado Protocolo de Quioto que marcava o compromisso dos países desenvolvidos na redução dos níveis de emissão de gases de efeito estufa (GEEs) até o ano de 2012 (MOREIRA e GIOMETTI, 2008).

O Brasil, na primeira versão do documento resultante do Protocolo de Quioto, não possuía metas ou compromissos de limitação de emissões de GEE por ser um país que ainda estava em desenvolvimento. No entanto, devido a considerações feitas pelo Senado dos Estados Unidos, o Protocolo de Quioto também impôs obrigações e compromissos para os países ainda em desenvolvimento, nesse caso China, México, Índia, Brasil e Coréia do Sul (SENADO FEDERAL, 2004).

Ao longo das últimas décadas, com a realização desses encontros que juntam grandes líderes mundiais para debater sobre as mudanças climáticas do planeta, chegou-se ao consenso de que a redução das emissões dos GEE são passos inevitáveis e necessários para mitigar os danos ao meio ambiente e para diminuir a velocidade com que vem acontecendo as mudanças climáticas.

Em todo esse contexto, o transporte de cargas surge como uma das atividades econômicas mais difíceis de descarbonizar, uma vez que os combustíveis fósseis são a principal fonte de energia para essa atividade, devido, principalmente, a densidade energética dos combustíveis utilizados. Além disso, também existem limitações de logística e de tecnologias

sustentáveis aplicáveis em larga escala para ocorrência de uma transição energética no setor (MEYER, 2020).

O sistema de transporte de mercadorias atua como uma atividade significativa para o desenvolvimento das atividades econômicas de um país. À medida que a economia de um país cresce, a infraestrutura de transportes e demanda de mercadorias também aumentam. Em países em pleno desenvolvimento como a China, entre os anos de 1975 e 2015, o setor de frete rodoviário cresceu em mais de 30 vezes. Além disso, apesar de ser um crescimento mais reduzido, a mesma alta acontece nos demais países. Como consequência, o setor de frete rodoviário tem desempenhado um papel crescente na demanda de petróleo global, respondendo por 18% do consumo de energia primária de petróleo em 2015 (MULHOLLAND *et. al* 2018).

Segundo Chen, Taylor e Kringos (2015), as estatísticas da Agência Internacional de Energia (EIA) mostram que o setor de transporte de cargas é responsável por cerca de 23% das emissões de GEE relacionadas com energia, sendo que esse número pode ainda aumentar para quase 50% em 2030 e para mais de 80% até 2050, considerando uma ausência de novas políticas, práticas e tecnologias sustentáveis para o setor.

A descarbonização do transporte rodoviário ainda é um desafio que perdura devido às grandes limitações ligadas à logística, custos e escalabilidade ainda existentes nas tecnologias e demais alternativas já desenvolvidas e pensadas. Porém, uma solução que tem se mostrado potencialmente assertiva e eficaz para a problemática existente na descarbonização desse setor é a eletrificação.

A infraestrutura existente para o fornecimento de eletricidade já é madura, muito embora ainda seja necessário complementos na matriz energética para suportar a demanda de energia do setor. Além disso, a bateria também é um componente necessário para implementação da tecnologia e que já teve grandes avanços tecnológicos para diminuição de custos de produção e ganhos de eficiência (NICOLAIDES; CEBON; MILES, 2018). Porém, é importante destacar que, a baixa densidade energética e o elevado tempo de recarga das soluções baseadas em baterias, ainda limitam consideravelmente a aplicação de veículos elétricos no setor de transporte rodoviário.

A tecnologia de carregamento condutivo *plug-in* teve grandes avanços nos últimos anos, principalmente na escalabilidade da tecnologia para veículos particulares e agora também para caminhões de pequeno porte que transitam com distribuição de mercadorias nos centros urbanos.

Para o setor de veículos pesados que atuam com distribuição de cargas de longas distâncias, as tecnologias de carregamento indutivo e carregamento condutivo por catenária



aérea têm se mostrado soluções interessantes para atuar com eficácia na descarbonização do setor. Ambas as tecnologias já possuem protótipos de testes sendo aplicados pelo mundo que ajudam a demonstrar as principais vantagens e desafios atrelados a cada solução.

A participação significativa do setor de transportes na demanda de energia e emissões de GEE, inseriu a problemática do setor nas pautas de compromissos de descarbonização das principais economias do mundo (MULHOLLAND *et. al* 2018). Dessa forma, este trabalho visa fornecer uma revisão das principais tecnologias em desenvolvimento, apontando também os desafios e custos atrelados para que o transporte rodoviário deixe de depender de combustíveis fósseis e caminhe em direção a utilização de fontes de energias mais limpas.

## **1.1 Objetivos**

Os objetivos desse trabalho são divididos em gerais e específicos, conforme indicado nas seções 1.1.1 e 1.1.2.

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Identificar as principais tendências e desafios atrelados à implementação de Veículos Elétricos (VE) no setor de transporte rodoviário de cargas, apresentando as três principais tecnologias atualmente estudadas e utilizadas: carregamento condutivo *plug-in*; carregamento indutivo; e carregamento condutivo por catenária aérea.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Analisar a utilização de combustíveis alternativos no setor de transporte rodoviário de cargas;
- Descrever as principais soluções atualmente desenvolvidas para inserção de veículos elétricos que atuem em rotas de longas distâncias e com cargas pesadas;
- Descrever os principais desafios atrelados às tecnologias descritas, sejam esses desafios técnicos ou de logística;
- Descrever os custos atrelados às tecnologias de eletrificação indicadas;
- Avaliar os impactos da nova carga no sistema elétrico brasileiro;
- Apontar os estados dos testes realizados das tecnologias de eletrificação indicadas.

## 1.2 Metodologia

Este trabalho trata-se de uma pesquisa de característica de revisão bibliográfica sobre as principais tendências e desafios atrelados à implementação de veículos elétricos no setor de transporte rodoviário de cargas. De acordo com Creswell (2015), a metodologia de revisão de literatura é uma das mais utilizadas em trabalhos científicos, uma vez que seus fundamentos e a validade dos dados levantados são bem aceitos nas teorias científicas.

Além disso, Marconi e Lakatos (2010) reforçam que a aplicação da metodologia é estabelecer uma ponte entre o objeto de pesquisa e o pesquisador, possibilitando o contato e a absorção com o conhecimento da temática estudada. Adicionalmente, é possível conseguir um maior nível de detalhes sobre o tema estudado, possibilitando que sejam esclarecidos diversos pontos, além de direcionar o estudo para pontos importantes a serem avaliados.

A revisão de literatura possui grande vantagem de possibilitar que o pesquisador consiga abranger todos os fatos e fenômenos que cercam a temática estudada, uma vez que possibilita a abordagem de uma forma mais ampla do que quando se realiza uma pesquisa direta (CRESWELL, 2015).

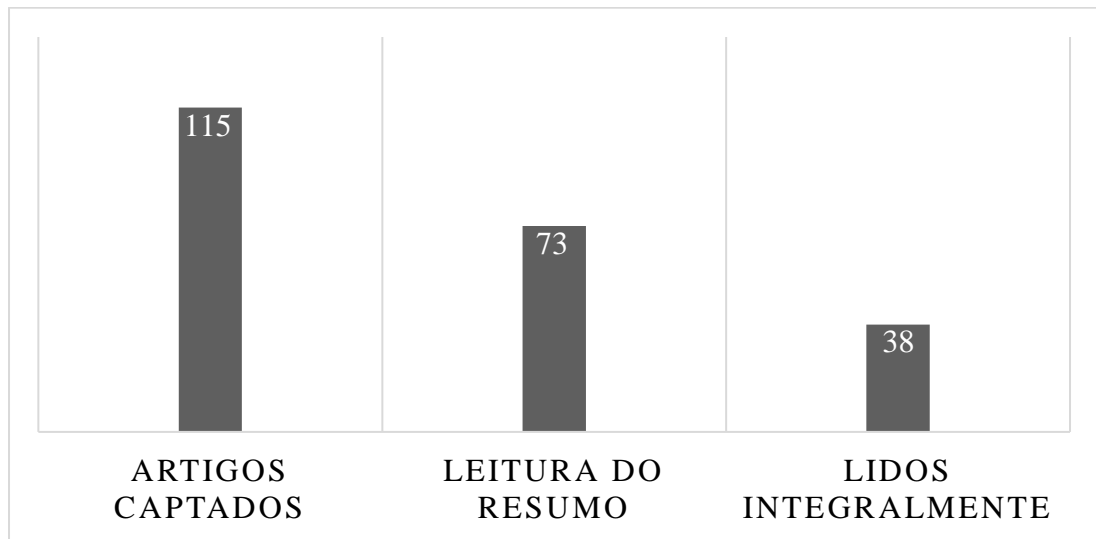
Para alcançar os objetivos propostos foi conduzida uma busca por referências nas fontes eletrônicas *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), Scopus, Scholar Google e sites. Por meio de palavras-chave como: “Eletrificação”; “Transporte de cargas”; “Carregamento indutivo”; “Carregamento *plug-in*”; “Carregamento condutivo por catenárias aéreas”, bem como com os respectivos termos na língua inglesa.

Os critérios de inclusão foram todos os artigos e conteúdo que apresentassem informações relevantes sobre a eletrificação do transporte rodoviário de cargas, carregamento indutivo dinâmico e estático, carregamento condutivo *plug-in* e por meio de catenárias aéreas, com os textos disponíveis na íntegra e de acesso gratuito. Enquanto aqueles que não apresentaram relevância para o estudo, que não estavam disponíveis na íntegra e que não possuíam acesso gratuito, não foram considerados para o trabalho.

Após a busca, iniciou-se a leitura do resumo de cada estudo encontrado. Consequentemente, as publicações que correspondiam com o objetivo proposto por esta respectiva revisão foram contabilizadas para prosseguir a leitura completa das mesmas, e as que não se encaixavam, eram excluídas da filtragem. Ao final, todos os artigos publicados e conteúdos relevantes identificados foram lidos completamente para o desenvolvimento deste trabalho.

Neste contexto, o gráfico indicado na Figura 1, traz a quantização dos artigos utilizados durante a revisão deste trabalho. Ao todo foram captados 115 artigos com a utilização das palavras chaves anteriormente indicadas. No entanto, para seguimento da leitura dos resumos foram filtrados 73 artigos. Por fim, para continuar com a leitura integral dos artigos seguiram, ao todo, 38 documentos.

Figura 1 - Quantitativo de artigos visitados



Fonte: Próprio Autor

Destaca-se que além de artigos, este trabalho também foi desenvolvido por meio de consultas em bases de dados de governo e de empresas privadas, com o propósito de buscar levantamento de dados relativos ao meio ambiente, ao consumo energético e ao resultado de testes desenvolvidos pelo setor privado. Para atingir esse propósito foram realizadas buscas em sites governamentais e privados por meio das palavras-chave anteriormente indicadas.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

Para melhor abordagem do conteúdo, este trabalho se encontra dividido em 4 capítulos.

O Capítulo 1 é dedicado à introdução ao tema, apresentando a contextualização de toda a problemática em que o assunto está inserido, bem como o cenário mundial de preocupações em relação às emissões de GEE.

No Capítulo 2 é possível encontrar, à caráter expositivo, sessões dedicadas à explicação de Combustíveis Alternativos, que se apresentam como uma outra via para a descarbonização do setor de transporte rodoviário, além da eletrificação.

No Capítulo 3 há a explicação das três principais tecnologias disponíveis no mercado para eletrificação de caminhões de longo curso, realizando uma abordagem sobre as tecnologias, os custos atrelados, os desafios ainda existentes e também trazendo uma amostra dos avanços de cada tecnologia existente até o momento.

O Capítulo 4 apresenta as conclusões do trabalho, trazendo a análise geral do que foi exposto durante a revisão e também a sugestão de trabalhos futuros.

## 2 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Além da eletrificação, existem outras alternativas que vêm sendo estudadas e testadas para promover a substituição dos atuais combustíveis fósseis por outras fontes de energia limpa que também viabilizam um futuro com baixas emissões de GEE no setor de transporte rodoviário. Não obstante, vale destacar que, apesar dos combustíveis alternativos se apresentarem como uma solução de curto e longo prazo frente à dependência do transporte rodoviário de fontes de energia derivadas do petróleo, há ainda muitos desafios a serem superados, como os altos custos de atenuação (*abatement cost*) (MULHOLLAND *et al.*, 2018).

Tendo em vista que a eletrificação não é a única alternativa para o setor e buscando também maior abrangência e completude do tema este capítulo é reservado à apresentação de três fontes alternativas de energia que podem também ser consideradas para utilização no setor de transporte rodoviário de cargas na busca de um futuro com baixas ou, até mesmo, com zero emissões de GEE, bem como à indicação das principais desvantagens na utilização dessas tecnologias.

### 2.1 Hidrogênio

Durante a década de 70, aconteceu a primeira crise de petróleo que o mundo já viu, impulsionando, assim, a busca por diversificação da matriz energética mundial. Em decorrência desse evento, o hidrogênio passou a ser cogitado como uma possível fonte de energia para substituir os combustíveis fósseis, por meio das Células a Combustível (CaC). Tais células atuam como agentes na conversão direta de energia química em energia elétrica e térmica, sendo essas células de funcionamento contínuo, produzindo, portanto, uma corrente contínua por meio da combustão eletroquímica do hidrogênio (FIGUEIREDO; CESAR, 2021).

Existem uma variedade de CaC sendo desenvolvidas pelo mercado para diversas aplicações. No entanto, para o setor automotivo, há duas principais tecnologias que estão sendo consideradas: células de combustível com membrana de polímero eletrolítico (sigla PEMFC, do inglês *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells/Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) e célula de combustível de óxido sólido (sigla SOFC, do inglês *Solid Oxide Fuel Cell*) (ZHAO *et al.*, 2018).

As CaC do tipo PEMFC apresentam diversas vantagens físico-químicas se comparadas com às demais, sendo menores, mais leves, mais duráveis e mais tolerantes a choques e vibrações. Além disso, as PEMFC possuem uma construção robusta e relativamente simples e,

devido a sua baixa temperatura de operação, de aproximadamente 80°C, essas células também proporcionam uma ágil resposta de acionamento e desligamento (CAMACHO; COSTA, 2008). Tais características fazem com que essas células sejam normalmente as mais indicadas para os veículos sustentáveis (MORENO *et al.*, 2015).

Já as SOFC podem ser projetadas para operar de modo eficiente em temperaturas significativamente superior em relação as PEMFC, na faixa dos 500°C aos 1000°C (MINH, 2004), favorecendo o aumento da velocidade das reações químicas e eletroquímicas. Adicionalmente, as células SOFC também apresentam uma maior facilidade para manuseio, são mais estáveis se comparadas com outros tipos de células e apresentam também altos valores de eficiência na conversão de energia (AMADO *et al.*, 2006). Segundo Wang *et al.* (2011), os desenvolvedores das SOFC esperam ainda que as células comerciais tenham uma vida útil de 10 à 20 anos, tempo de duas a quatro vezes superior ao esperado de outras células de combustível.

Apesar do otimismo em relação às células de hidrogênio e da elevada densidade energética no que se refere à massa do hidrogênio, ainda há muitos fatores que limitam o uso desse recurso em veículos pesados de carga como o custo da tecnologia, a baixa densidade energética do hidrogênio em relação ao volume, a durabilidade das células, as formas de armazenamento do hidrogênio, assim como também a necessidade de uma grande rede de abastecimento de hidrogênio (ZHAO *et al.*, 2018).

Segundo Zhao *et al.* (2018), para que as células a combustível possam ser comercializadas no setor de veículos pesados, as CaC precisam atingir a durabilidade de, aproximadamente, 10.000 horas para evitar que haja substituição das células em menos de 5 anos. No entanto, segundo Robalinho e Santos (2021), as células de PEMFC para aplicação veicular estão com tempo de vida atuais ainda em torno de 3.900 horas. Além disso, o custo energético das células de PEMFC é de US\$53/kW. Porém, segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos (*United States Department of Energy – U.S. DOE*), essas células somente serão viáveis quando seu custo energético estiver abaixo de US\$40/kW. Já para as células a combustível SOFC, o custo médio estimado pelos especialistas para sistemas de fabricação em alto volume é de US\$1.200/kW (WHISTON *et al.*, 2019), que é mais de 20 vezes o custo das células PEMFC.

Vale destacar ainda que, para utilizar o hidrogênio como combustível para as células, é necessário obter o gás através de outros processos químicos e, atualmente, as formas de obtenção do hidrogênio ainda contribuem bastante para emissão dos gases de efeito estufa. A demanda global de hidrogênio no ano de 2020 foi de 90 Mt e esse valor foi atendido quase

inteiramente através de combustíveis fósseis, com 72 Mt (79%) vindas por meio do gás natural e do carvão mineral. Devido essa predominância dos combustíveis fósseis para obtenção do hidrogênio, o combustível se torna uma opção não muito interessante para o processo de descarbonização, tendo em vista que a produção de hidrogênio em 2020 foi responsável por quase 900 Mt das emissões diretas de CO<sub>2</sub>, um valor equivalente às emissões de países como a Indonésia e o Reino Unido juntos (IEA, 2021).

Apesar de atualmente já existir recursos em que se pode obter o hidrogênio de uma forma totalmente limpa, o chamado hidrogênio verde, essas tecnologias somente são responsáveis pela produção de 0,73% da demanda mundial (IEA, 2021).

## 2.2 Biocombustíveis

Uma outra alternativa para substituição dos combustíveis mais poluentes utilizados atualmente são os biocombustíveis, principalmente o biodiesel e o etanol. Os biocombustíveis são fontes de energia renováveis produzidos a partir da transesterificação ou da esterificação de matérias graxas ou de gorduras de origem vegetal ou animal. Nesse contexto, por serem biodegradáveis, os biocombustíveis oferecem menos impacto ao meio ambiente se comparado com os combustíveis fósseis. (ANP, 2019)

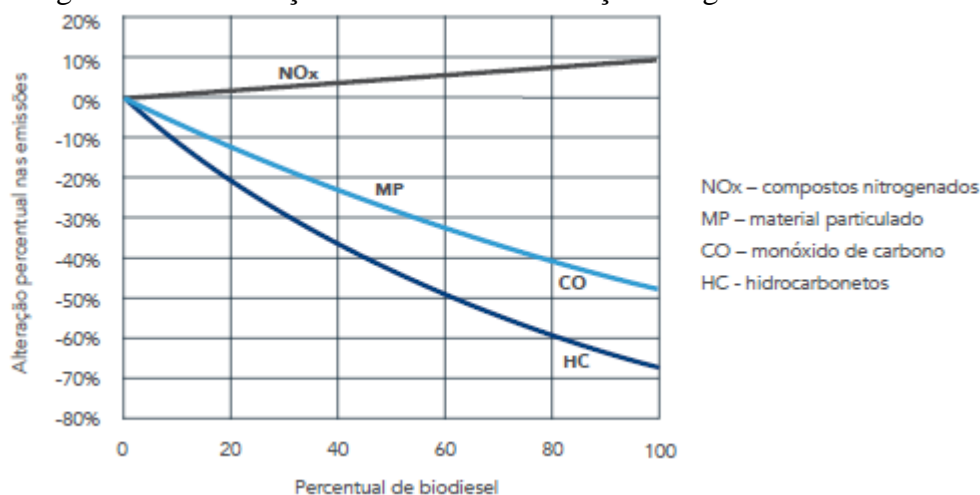
Em termos mundiais, principalmente devido à preocupação com o meio ambiente e à necessidade de diversificação da matriz energética, há diversas políticas de incentivo à produção dos biocombustíveis. Nos Estados Unidos, o RFS (*Renewable Fuel Standard* ou, em tradução livre, Padrões de Combustíveis Renováveis) é um programa federal que foi ampliado e prorrogado pelo EISA (*Energy Independence and Security Act* ou, em tradução livre, Ato de Segurança e Independência Energética) em 2007. O programa define que volumes crescentes de biocombustíveis devem ser misturados aos combustíveis convencionais até o ano de 2022. Na União Europeia foi anunciado, em dezembro de 2016, uma alteração na política de segurança energética e mitigação da emissão de gases do efeito estufa, essa nova proposta foca em fontes avançadas de energia, inclusive nos biocombustíveis de segunda geração (FGV, 2017).

Já o Brasil iniciou em 1975 suas políticas de incentivo à utilização dos biocombustíveis com o Programa Nacional do Alcool (Proálcool) que definia um mandato para inserção de etanol à gasolina. Posteriormente, o Brasil ainda lançou programas como o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) e a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) lançada em dezembro de 2017, objetivando estimular o aumento da produção de

biocombustíveis no país em padrões sustentáveis e também contribuir com o alcance das metas estabelecidas no Acordo de Paris. (VIDAL, 2019)

Em termos práticos, segundo a FGV (2017), o etanol produzido a partir do milho tem um potencial de redução de gases de efeito estufa de 19%, já o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar tem um potencial de redução de 78% e o etanol celulósico de 86%. Por outro lado, considerando a adição do biodiesel ao diesel, a redução dos gases poluentes ocorre de acordo com a Figura 2, que indica que o percentual de emissões de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) é reduzido de acordo com o aumento da concentração de biodiesel na mistura. Por outro lado, o aumento do percentual de biodiesel, aumenta as emissões dos compostos nitrogenados (NOx).

Figura 2 - Contribuição do biodiesel na redução dos gases de efeito estufa



Fonte: FGV (2017)

Apesar das altas reduções na emissão dos gases de efeito estufa, um fator relevante a se considerar é a caracterização das propriedades dos biocombustíveis, constituindo um importante ponto para determinação da qualidade do combustível utilizado (MAHMUDUL *et al.*, 2017). No entanto, levando em consideração o foco do trabalho e que as propriedades dos biocombustíveis se alteram de acordo com a matéria-prima utilizada na produção, com as concentrações de combustíveis das misturas realizadas e outros fatores, este trabalho não entrará em maiores detalhes quanto à caracterização das propriedades dos biocombustíveis.

De forma geral, é possível afirmar que, além das reduções nas emissões dos gases de efeito estufa, outras vantagens que se podem ser citadas em relação ao biodiesel, se comparado ao diesel, consistem na facilidade de produção, melhoria no desempenho do veículo, maior eficiência de combustão, redução do teor de enxofre e da fumaça visível, entre outros fatores



(HASSAN; KALAM, 2013). Por outro lado, as desvantagens do biodiesel consistem em maiores emissões dos compostos nitrogenados, sua natureza corrosiva ao entrar em contato com materiais de cobre e latão, diminuição da velocidade e potência do motor, depósitos de carbono no pistão e na cabeça do motor, desgaste excessivo do motor, maior viscosidade do combustível, causando problemas no bombeamento, na combustão e no sistema injetor do motor e, além de todos os fatores já citados, vale pontuar que, em termos de custos, o biodiesel não é competitivo com a gasolina ou com o diesel (MAHMUDUL *et al.*, 2017).

Já em relação à utilização do etanol como biocombustível, é possível destacar que o seu ponto de fulgor é mais elevado, garantindo maior segurança em seu manuseio e transporte. O etanol também melhora a eficiência do motor por proporcionar uma maior conversão de energia térmica em energia mecânica (HUSAM; SANDUN, 2017). Por outro lado, Elfasakhany (2021) alerta para problemas com a partida do motor em climas frios, possibilidade de ocorrer bloqueios de vapor em climas quentes e calorosos, além também da incompatibilidade do combustível com determinadas partes de metais do motor. A FGV (2017) também destaca que o poder calorífico do etanol é, aproximadamente, 30% inferior ao da gasolina.

Por fim, há uma outra grande questão em relação à utilização da biomassa para produção de biocombustíveis, que consiste no dilema existente entre a segurança alimentar e energética. De um lado, é possível ver que países como o Brasil e os Estados Unidos incentivam a produção dos biocombustíveis de primeira geração, mas, de outro lado, diversos países e organizações internacionais mostram preocupação no aumento da crise mundial dos alimentos, justificando que o problema foi agravado justamente pela transferência das áreas tradicionalmente utilizadas para cultivo de alimento para produção de insumos destinados à indústria dos biocombustíveis. (SUAREZ *et al.*, 2009)

### **2.3 Gás natural**

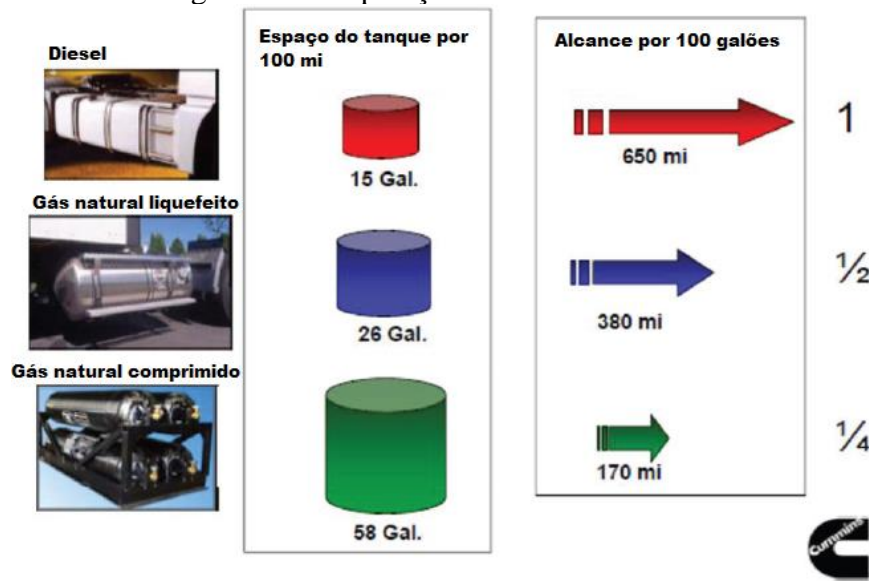
Diferentemente dos combustíveis tradicionais, o gás natural (GN) costuma ser considerado um combustível alternativo de baixo custo. Devido à menor concentração de carbono presente no metano (CH<sub>4</sub>), o GN libera menos dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por unidade de energia utilizável do que outros combustíveis fósseis e, assim, o gás natural apresenta uma forte vantagem na redução da emissão de gases do efeito estufa e um posicionamento estratégico relevante na transformação dos setores de energia e transporte (ZHANG *et al.*, 2021).

No entanto, a afirmação de que o GN seria benéfico para o clima merece estudos mais aprofundados e detalhados. Apesar de ser verídico que há uma menor emissão de CO<sub>2</sub> na queima do gás natural, os potenciais benefícios climáticos em decorrência desse fato podem ser bem menores ou até mesmo adiados por décadas ou séculos, dependendo da quantidade de perda de CH<sub>4</sub> na cadeia de fornecimento do GN e também da quantidade de CH<sub>4</sub> não queimado que pode ser emitido pelo veículo. Adicionalmente, vale pontuar que, embora o CH<sub>4</sub> decaia mais rapidamente na atmosfera se comparado ao CO<sub>2</sub>, o metano é um gás de efeito estufa mais poderoso e sua influência no clima é significativa (CAMUZEUX *et al.*, 2015).

Também é importante ressaltar que a eficiência de um motor a gás natural é consideravelmente inferior à dos motores a diesel. Além da baixa eficiência, se destaca também que os tanques de Gás Natural Liquefeito (GNL) e Gás Natural Comprimido (GNC) são mais pesados e mais caros. Um tanque de GNC mais combustível pesa cerca de quatro vezes mais do que um tanque de diesel mais combustível, já para um tanque GNL o peso é, aproximadamente, duas vezes superior. Além disso, o custo de armazenamento de GNL ou GNC adiciona US\$40.000 ou US\$50.000 ao custo de um caminhão, porém, considerando o baixo valor do gás natural, o período de retorno desse investimento é por volta de 2 anos. (*National Research Council*, 2014)

A Figura 3 mostra uma comparação entre volume e alcance dos tanques de diesel em relação aos tanques de gás natural comprimido e gás natural liquefeito. Se pode notar que, considerando um mesmo volume de tanque, é possível armazenar uma maior quantidade de GNC. Por outro lado, considerando um mesmo volume de combustível, o GNL é capaz de percorrer apenas metade da distância que o diesel percorreria, e o mesmo volume de GNC seria capaz de atingir somente um quarto dessa distância.

Figura 3 - Comparação de volume e alcance



Fonte: Adaptado de National Research Council, 2014

Por fim, Nicolaidis, Cebon e Miles (2018) destacam em seu trabalho que, apesar do gás natural ser uma medida provisória válida para reduzir de 10-15% as emissões de CO<sub>2</sub>, o combustível jamais poderá atingir os níveis mais profundos de descarbonização estabelecidos nos acordos internacionais de meio ambiente.

### 3 ELETRIFICAÇÃO

A eletrificação do transporte rodoviário se iniciou há bastante tempo com os veículos de transporte público nas grandes cidades, conhecidos como trólebus. Segundo Moraes (2019), o primeiro sistema de trólebus do Brasil foi inaugurado em São Paulo no ano de 1949. O tipo de tecnologia implementada nos trólebus é semelhante ao sistema do *electromote* desenvolvido por Dr. Ernst Werner Von Siemens e apresentado ao público no ano de 1882 em Berlim.

Na Figura 4, é possível verificar a ilustração de um *electromote*, que consiste em uma carruagem que se locomovia por meio de um cabo acoplado a uma linha elétrica aérea, não sendo puxada por cavalos ou conduzida sobre trilhos, como normalmente acontecia na época.

Já na Figura 5, é exibido o dia da inauguração da primeira linha de trólebus em São Paulo. Na foto, também é possível ver os cabos elétricos de alimentação do veículo, acoplados às linhas de distribuição.

Figura 4 - O primeiro trólebus do mundo



Fonte: Siemens (2020)

Figura 5 - Tróibus na inauguração da primeira linha em São Paulo



Fonte: Silva (2019)

Segundo Brunton (1992), apesar dos tróibus possuírem uma operação silenciosa, sem vibração e de alto desempenho, gerando grande satisfação nos passageiros que utilizavam os veículos, a inflexibilidade operacional, devido às rotas fixas, dificultou a integração dos tróibus com a dinâmica das grandes cidades e com os ônibus comuns, dificultando a expansão da frota de tróibus e contribuindo para sua escassez.

Segundo Chen, Taylor e Kringos (2015), para contornar a problemática apresentada pelos tróibus, novos tipos de tecnologias vêm sendo estudadas para constituírem uma fonte para alimentação de veículos elétricos pesados, como o conceito *Siemens E-Highway* que utiliza um modelo de catenária aérea móvel para transmissão de energia elétrica para o caminhão e o método de armazenamento de energia a bordo por meio da utilização de baterias, podendo o carregamento dessas baterias ser realizado através de contato direto da fonte com a carga por meio de um cabo condutor (carregamento *plug-in*) ou por meio da transferência de energia sem fio (*wireless power transfer*) que é capaz de fornecer energia quando o veículo está em movimento.

Esta sessão se dedica a fornecer uma revisão sobre as tecnologias de carregamento condutivo *plug-in*, transferência indutiva de energia e carregamento condutivo por catenária, apresentando os conceitos por trás de cada tecnologia, identificando o status de

desenvolvimento atual de cada uma delas no mercado, além de também apresentar os custos e os desafios atrelados a cada sistema.

### **3.1 Carregamento condutivo *plug-in***

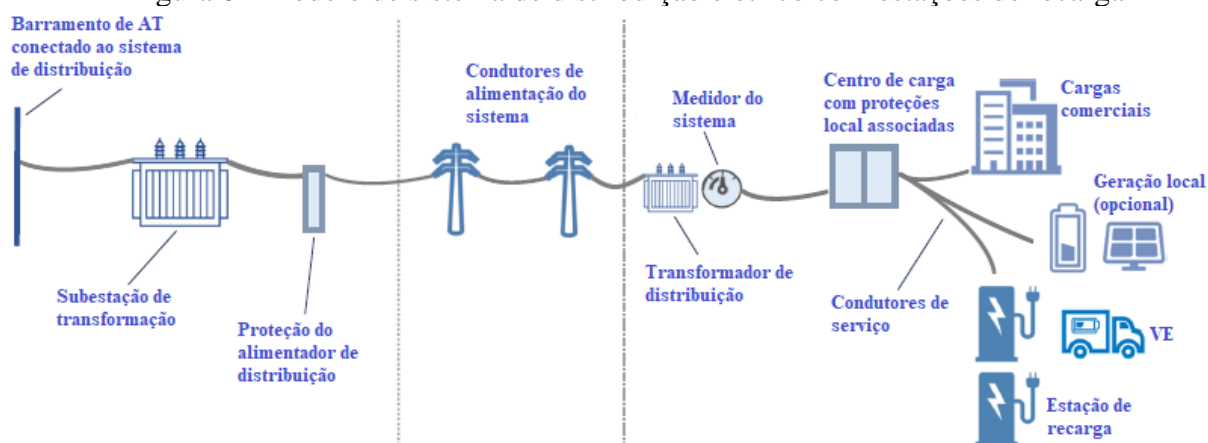
O mercado de carros leves viu, nos últimos anos, uma proliferação de veículos elétricos híbridos (VEH), fato esse que não se refletiu no mercado de veículos pesados por diversas razões, entre essas razões é possível citar os níveis de autonomia dos veículos que ainda é um valor de curtas distâncias e a natureza comercial do mercado em que os caminhões de carga estão envolvidos, uma vez que, devido ao modelo de negócio, se torna necessário levar em consideração a rentabilidade econômica na operação dessa atividade comercial. Adicionalmente, ainda é possível destacar a diversidade que existe na logística, nos modelos de caminhões existentes e na dinâmica de funcionamento do serviço de rotas rodoviárias, tornando difícil a elaboração de um projeto de eletrificação único que funcione bem com os diferentes perfis existentes e também com a demanda de carga elétrica exigida (VORA *et al.*, 2017).

Para que o sistema elétrico de distribuição possa suprir a demanda de eletricidade do carregamento dos veículos elétricos de carga é necessário que exista um sistema de distribuição secundário semelhante ao que já é implementado para suprir a demanda de energia da população, esse sistema inclui principalmente: plantas de geração de energia; subestações de distribuição; redes de distribuição; alimentadores; centros de cargas com proteções associadas alocadas próximo ao local de carregamento; entre outros equipamentos.

Segundo estudos realizados por BORLAUG *et al.* (2021), as necessidades energéticas dos veículos elétricos que utilizam essa modalidade de carregamento variam entre 114 e 365 kWh por veículo por dia, dependendo da frota, da logística implementada, do caminhão, entre outros fatores. BORLAUG *et al.* (2021) ainda verificou que, apesar da variabilidade local de condições de rede, as subestações abordadas na pesquisa podem fornecer energia para 100 caminhões eletrificados, cada um com uma bateria de 100 kW, indicando que a maioria das subestações podem suportar a inclusão desses veículos, se implementado uma logística de carregamento eficaz e corretamente gerenciada.

Na Figura 6, é possível verificar a exemplificação de um modelo simplificado do sistema de distribuição elétrico já existente, indicando uma estação de recarga para caminhões elétricos.

Figura 6 - Modelo de sistema de distribuição elétrica com estações de recarga



Fonte: Adaptado de BORLAUG *et al.*, 2021

Os veículos que funcionam com esse modelo de carregamento também devem contar com modelos de bateria de íon de lítio que abranjam dois aspectos: desempenho elétrico dinâmico da bateria para corresponder à demanda de energia transitória do veículo; e efeito de envelhecimento/degradação na bateria, considerando o ciclo de vida das células empregadas e seu desgaste temporal natural (VORA *et al.*, 2017).

Em seu estudo, VORA *et al.* (2017) apontou ainda que existem dois modelos empregados para os casos de recarga de VE: modelos de circuitos equivalentes, que representam uma célula eletroquímica por meio de uma fonte de tensão, resistores, capacitores e indutores; e modelos baseados na física que tentam modelar os fenômenos físicos subjacentes que constituem a carga e descarga reversíveis de uma bateria eletroquímica. Destaca-se que os modelos físicos são mais escaláveis, porém mais caros.

Dois fatores importantes para operatividade dessa tecnologia em veículos elétricos é o tamanho e o peso das baterias utilizadas. Segundo BATEMAN *et al.* (2018), a densidade de energia da bateria determina seu peso em kg. Nesse caso de carregamento *plug-in*, o peso da bateria pode chegar a representar entre 25% e 35% do peso do veículo. Em 2012, a densidade de energia de uma bateria para aplicação veicular era de 100 Wh/kg e a meta dos fabricantes de veículos elétricos era atingir 250 kWh/kg até 2020, o que significa uma autonomia de 330 km, mantendo peso e tamanho da bateria em níveis adequados.

Por mais que nessa categoria sejam ainda considerados veículos híbridos que contam com a utilização de combustíveis fósseis, tendo em vista a limitação da tecnologia de baterias, um estudo realizado por Yang, Hao e Chai (2018) mostrou que a emissão média de gases de efeito estufa podem reduzir em até 70% com a utilização dessa tecnologia, considerando, inclusive, as emissões de gases poluentes no processo de produção das baterias.

Por fim, ressalta-se que a eletrificação de veículos pesados que utilizam a tecnologia *plug-in* pode induzir mudanças na forma como os VE são operados de maneira geral para facilitar seu carregamento. Adicionalmente, destaca-se que, nesse caso, também se torna uma necessidade a avaliação de projetos de tarifas de eletricidade quanto à sua capacidade de fornecer energia de baixo custo para carregamento de veículos elétricos pesados, como por exemplo, alinhando o carregamento de veículos elétricos com geração de eletricidade renovável e aliviando os impactos nos sistemas de distribuição (BORLAUG *et al.*, 2021).

### 3.1.1 Status atual

Diversas empresas, principalmente do setor privado, estão direcionando recursos para implementação de veículos elétricos em sua frota de caminhões. Todos esses esforços se dão devido ao avanço da tecnologia e ao compromisso mundial com as metas de sustentabilidade, disseminadas principalmente pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), e de descarbonização.

Uma das principais empresas que estão investindo de maneira pesada na substituição de veículos elétricos é a Ambev. Já no ano de 2021, a maior empresa de bebidas fechou uma parceria com a empresa chinesa JAC Motors e adquiriu 150 unidades do caminhão elétrico iEV1200T (ANDRADE, 2021).

O modelo iEV1200T é totalmente elétrico e focado em rotas de distribuição urbana, tendo em vista que sua autonomia é de 200 km. O seu modo de carregamento é *plug-in* e suporta carregamento lento AC e carregamento rápido DC, com tempo estimado em 13 h e 2 h, respectivamente. A bateria possui capacidade total de 97 kWh e o valor do veículo no mercado está custando aproximadamente 490 mil reais (JAC Motors, 2022). Na Figura 7 é possível ver o modelo iEV1200T da JAC Motors.



Figura 7 - Modelo do caminhão elétrico iEV1200T



Fonte: JAC Motors, 2022

Outro modelo também adquirido pela Ambev é o e-Delivery da Volkswagen. O e-Delivery, que possui as variações de modelo 11 e 14, possui um motor de 300 kW, equivalente a 408 cv e garante uma autonomia de até 250 km. A Volkswagen afirma ainda que é possível atingir 80% de carga na bateria em 45 minutos. Esses caminhões também contam com um sistema de recuperação de energia cinética, capaz de recuperar até 40% da energia que é dissipada na frenagem. O e-Delivery 11 custa aproximadamente R\$ 690.000, enquanto a variante do modelo, o e-Delivery 14, custa a partir de R\$ 800.000. Destaca-se que a principal vantagem do modelo 14 está no torque imediato de 219 kgfm (PASSOS, 2021).

Na Figura 8 é possível verificar o e-Delivery 11 à esquerda e a sua variante, o e-Delivery 14, à direita.

Figura 8 - Modelos e-Delivery 11 e 14



Fonte: PASSOS, 2021

Outras grandes empresas como Danone, CPFL, Grupo Emtel e Seara também direcionaram recursos para eletrificação de suas frotas de caminhões e investiram nos modelos citados da JAC Motors e da Volkswagen (VILLELA, 2022; MERCADO&CONSUMO, 2022; GRUPO EMTTEL, 2022; CRUZ, 2021).

### 3.1.2 Custos

Segundo BORLAUG *et al.* (2021), os principais custos referentes à implementação da tecnologia *plug-in*, estão relacionados à implementação de atualizações das redes do sistema de distribuição com o objetivo de suportar a demanda de energia dos veículos elétricos. A Tabela 1 traz um resumo da estimativa dos custos dos principais itens associados às implementações do sistema elétrico, assim como também indica uma estimativa de tempo para implementação de cada item indicado.

Tabela 1 - Resumo das atualizações do sistema de distribuição de eletricidade para carregamento de veículos elétricos *plug-in*

Categoria do componente	Atualização necessária	Custo	Tempo de implementação (mês)
Cliente final	Carregador rápido de 50 kW	Aquisição por plug: US\$ 20 k – 36 k Instalação por plug: US\$ 10 k – 46 k	3 – 10
	Carregador rápido de 150 kW	Aquisição por plug: US\$ 75 k – 100 k Instalação por plug: US\$ 19 k – 48 k	
	Carregador rápido de 350 kW	Aquisição por plug: US\$ 128 k – 150 k Instalação por plug: US\$ 26 k – 66 k	
	Instalação de medidor	US\$ 1,2 k – 5 k	
Rede de distribuição	Instalação de transformador de distribuição (+200 kW de carga)	Aquisição: US\$ 12 k – 175 k	3 – 8
Alimentadores	Instalação/Atualização do alimentador (+5 MW de carga)	US\$ 2 – 12 milhões	3 – 12
	Disjuntores associados ao sistema	~US\$ 400 k	6 – 12
Subestações	Atualização em subestações (3 a 10 MW)	US\$ 3 – 5 milhões	12 – 18
	Instalação de novas subestações (3 a 10 MW)	US\$ 4 – 35 milhões	24 – 48

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

Outro custo importante associado a essa tecnologia está no preço das baterias. Historicamente, considerando os últimos 10 anos, foi observado uma rápida redução nesses custos: US\$1000/kWh em 2010; US\$350/kWh em 2015; e US\$227/kWh em 2018. Espera-se que o preço diminua ainda mais nos próximos 10 anos, chegando em US\$120/kWh até 2025 e US\$75/kWh até 2030 (BATEMAN *et al.*, 2018).

### 3.2 Transferência de energia sem fio – *Wireless Power Transfer* (WPT)

A tecnologia de Transferência de Energia sem Fio, do inglês *Wireless Power Transfer* (WPT), foi introduzida no século XIX pelo físico norte-americano Nikola Tesla com o objetivo de responder a uma demanda de energia de sua época ainda muito primitiva. A ideia consiste em fornecer energia elétrica de um ponto a outro através de ondas eletromagnéticas. Porém, Tesla não obteve êxito na implementação de seus sistemas WPT, tendo em vista que seus objetivos estavam muito à frente da tecnologia existente na sua época (LAKHAL *et al.*, 2013).

Por meio dos avanços da eletrônica e com o passar do tempo, a tecnologia idealizada por Tesla se desenvolveu, tornando-se uma solução competitiva com os sistemas de carregamento com fio, e uma tecnologia viável para fornecer mais autonomia e mobilidade, fazendo com que as pesquisas focassem em desenvolver estruturas capazes de permitir o fluxo de energia sem contato na forma de ondas eletromagnéticas ou estáticas (MRABET, 2010; FARINHOLT, PARK e FARRAR, 2009; REN e CHANG, 2006).

A Figura 9 traz um esquema simplificado do funcionamento de um sistema WPT. Nesse sistema, a energia é transferida através de ondas para um receptor que, por sua vez, a transfere para baterias ou outros sistemas de acionamento.



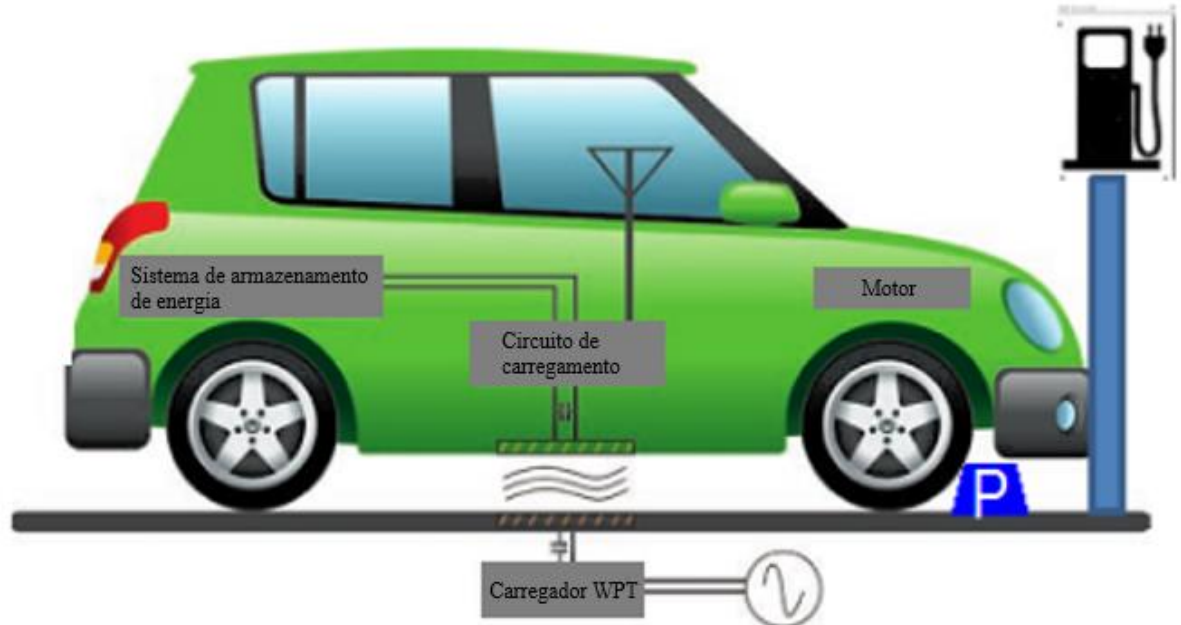
Fonte: Adaptado de MAHESH; CHOKKALINGAM; MIHET-POPA, 2021

O carregamento sem fio pode ser aplicado de três formas: carregamento sem fio estacionário, do inglês *Stationary Wireless Charging* (SWC); carregamento sem fio dinâmico, do inglês *Dynamic Wireless Charging* (DWC); e carregamento sem fio quase dinâmico/estacionário, do inglês *Quasi-Dynamic/stationary Wireless Charging* (QDWC) (MAHESH; CHOKKALINGAM; MIHET-POPA, 2021).

A tecnologia SWC está se desenvolvendo de forma gradual e consiste em um método para realizar o carregamento indutivo de veículos elétricos que ficam estacionados por um longo período de tempo (ETACHERI, 2011). Na tecnologia DWC, dispositivos de transmissão de energia elétrica são inseridos em uma pequena parte da pavimentação e um outro dispositivo de recepção é alocado no chassi do veículo elétrico para realização do carregamento, o que pode levar a diminuição do tamanho das baterias, uma vez que a recarga é feita ao longo do percurso. No caso do sistema DWC, destaca-se que o veículo pode viajar em velocidade constante ou variável, sendo necessário, portanto, considerar sua velocidade para seu devido carregamento. O sistema QDWC é um método alternativo que necessita de menos investimento, se comparado ao DWC. O modo QWC fornece energia elétrica aos veículos quando estão em posição estacionária ou quando se movem lentamente por curtos períodos de tempo, sendo esse modo mais indicado para o transporte público (BARRY, 2021).

A Figura 10 ilustra o modelo de carregamento sem fio estacionário, em que o veículo necessita estar parado sobre um dispositivo transmissor de energia para que seja realizada a recarga.

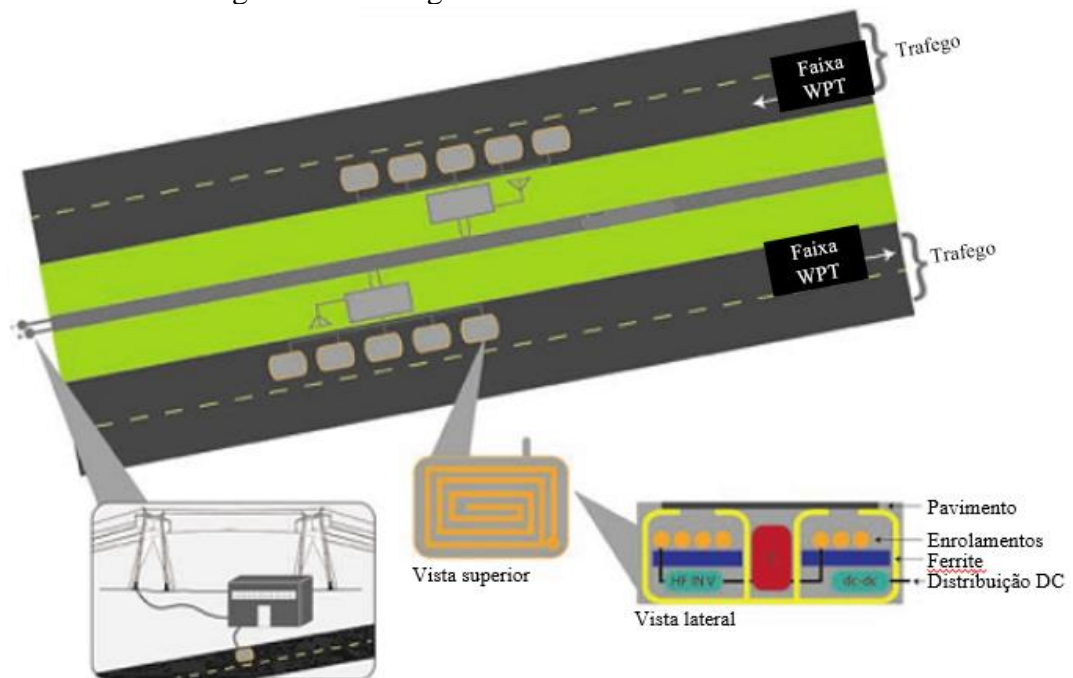
Figura 10 - Carregamento sem fio estacionário



Fonte: Adaptado de TAIBER, 2014

A Figura 11 ilustra o modelo de carregamento sem fio dinâmico, em que é possível realizar a recarga do VE à medida que o veículo se movimenta, tendo em vista que os dispositivos transmissores de energia são implementados em toda uma faixa exclusiva da rodovia.

Figura 11 - Carregamento sem fio dinâmico



Fonte: Adaptado de TAIBER, 2014

Segundo Mahesh, Chokkalingam e Mihet-Popa (2021), as principais características de um sistema WPT são:

- Divisão do sistema WPT em diferentes categorias em relação às faixas de potência de transmissão: faixa de baixa potência (<1 kW); faixa de média potência (1-100 kW); e faixa de alta potência (>100 kW);
- Transferência de potência de forma uni (rede para veículo) e bidirecional (veículo para rede e vice-versa);
- Diferentes meios para realização da transferência de energia;
- O meio de transmissão de energia pode afetar a eficiência do sistema. Por exemplo, um sistema WPT subaquático fornece uma eficiência 5% menor se comparado com o sistema de entreferro (ar como meio).

Segundo Chen, Taylor e Kringos (2015), existem seis tipos principais de tecnologias de transmissão de energia sem fio que estão sob investigação para veículos elétricos, são elas: transferência indutiva de carga, do inglês *Inductive Power Transfer* (IPT); transferência capacitiva de carga, do inglês *Capacitive Power Transfer* (CPT); transferência de acoplamento de ímã permanente, do inglês *Permanent Magnet Coupling Transfer* (PMPT); transferência indutiva ressonante de carga, do inglês *Resonant Inductive Power Transfer* (RIPT); transferência de energia indutiva on-line, do inglês *On-line Inductive Power Transfer* (OLPT);

transferência de potência com antenas ressonantes, do inglês *Resonant Antennae Power Transfer* (RAPT).

De acordo com Qiu *et al.* (2013), a IPT é uma tecnologia popular amplamente utilizada em motores de indução e também em eletrônicos de carregamento sem fio, porém é importante ressaltar que a potência transferida no processo por IPT decai rapidamente à medida em que a distância entre os dispositivos utilizados para carregamento aumenta. Dessa forma, para se obter um maior alcance para operação, bem como uma eficiência suficientemente alta, a tecnologia RIPT se torna uma opção mais interessante.

Por outro lado, segundo Shinohara (2013), as tecnologias RAPT e OLPT possuem também uma alta eficiência na transferência de energia, mas necessita de caminhos de transmissão diretos e mecanismos de rastreamento complexos, sendo normalmente mais empregadas nas transmissões de sinais em que a potência necessária não ultrapassa os níveis de microwatts.

Já a tecnologia CPT possui um grande desafio em relação à baixa capacitância de acoplamento, tendo em vista que a permissividade do vácuo ou do ar é baixa ( $\epsilon = 8,85 * 10^{-12}$  F/m). Somente materiais dielétricos caros e especiais podem ser usados para aumentar a capacitância, tornando a tecnologia impraticável para carregamento de VE (LIU, 2011). Em relação à tecnologia PMPT, destaca-se que esta utiliza a força mecânica como meio de transporte de energia e possui aplicações para motores de VE que ainda estão sendo estudadas (MAHMOUDITABAR; VAHEDI; TAKORABET, 2022).

A Tabela 2 fornece um breve resumo para realizar uma comparação e uma classificação das diferentes tecnologias WPT citadas para carregamento de VE, considerando os fatores de energia, alcance e eficiência. Nota-se que as tecnologias RIPT e PMPT são mais promissoras se considerado os três fatores indicados, porém, considerando a maturidade, o atual desenvolvimento e aplicação no mercado de VE, este trabalho abordará maiores detalhes apenas para a tecnologia IPT/RIPT.

Tabela 2 - Classificação e comparação de diferentes tecnologias WPT para carregamento de veículos elétricos

Meio de transporte da energia	Tecnologia	Energia	Alcance	Eficiência	Comentário	
Campo eletromagnético	Campo próximo	IPT	Alta	Baixo	Alta	Baixo alcance para carregamento de VE
		RIPT	Alta	Médio	Alta	Capaz de realizar carregamento de VE
	Campo distante	RAPT	Alta	Alto	Alta	Necessita de caminhos de transmissão diretos e mecanismos de rastreamento complexos
		OLPT	Alta	Alto	Baixa	Baixa eficiência para carregamento de VE
Campo elétrico	CTP	Baixa	Baixo	Alta	Baixa energia e alcance para carregamento de VE	
Força magnética	PMPT	Alta	Médio	Alta	Capaz de realizar carregamento de VE	

Fonte: Adaptado de QIU *et al.*, 2013

Uma das principais vantagens do sistema de carregamento sem fio está relacionada ao fato de que esse método pode funcionar sem que seja necessária a intervenção humana. Além disso, o sistema também é seguro, uma vez que não há presença de fios, evitando, assim, os perigos que podem ser causados pelo uso de cabos. Essas vantagens tornaram a tecnologia sem



fio ainda mais adequada para aplicação em larga escala e para a infraestrutura de carregamento automatizada de sistemas de transportes eletrificados (MAHESH; CHOKKALINGAM; MIHET-POPA, 2021).

### **3.2.1 Transferência indutiva de carga – *The Inductive Power Transfer* (IPT)**

Vários métodos de transferência de energia indutiva sem fio para carregar veículos elétricos estão sendo desenvolvidos, conforme mostrado na Tabela 2. O carregamento indutivo dinâmico exige que haja uma eletrificação da estrada para permitir o fornecimento de energia para os caminhões de carga e, portanto, apresenta vários desafios que devem ser abordados antes que o carregamento indutivo dinâmico na estrada possa ser adotado pelo sistema rodoviário (ZHAO *et al.*, 2018). Já o carregamento indutivo estacionário pode ser encontrado em estacionamentos e garagens e oferecem um melhor controle de recarga e confiabilidade se comparado com o sistema indutivo dinâmico (JAYALATH; KHAN, 2020).

As subseções a seguir fornecem uma revisão do conceito da tecnologia de transferência de energia indutiva, do seu cenário atual, além de também apontarem seus desafios operacionais e de infraestrutura. Tendo em vista que a tecnologia empregada no carregamento indutivo estacionário e dinâmico são semelhantes, as subseções a seguir terão foco no modelo dinâmico, uma vez que este é o mais indicado para transporte de cargas, mas também trarão determinados exemplos aplicados com o modelo estacionário.

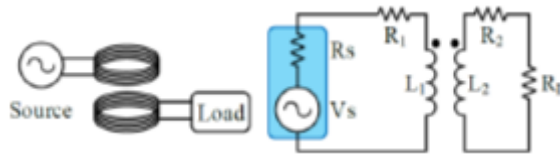
#### **3.2.1.1 Conceitos do carregamento sem fio indutivo**

O carregamento de veículos elétricos através de dispositivos indutivos de recarga sem fio pode ser realizado em estacionamentos, rodovias, estradas urbanas, garagens etc. Em um sistema de carregamento indutivo, a energia é transferida sem fio através de um campo magnético. O modelo técnico e conceitual desses carregadores é semelhante ao esquema utilizado em transformadores de energia, sendo que, nesse caso, uma bobina transmissora é colocada sob o asfalto, o que representaria o lado primário do transformador, e uma bobina receptora é inserida abaixo do veículo, representando o lado secundário (DANESE *et al.*, 2021).

A transferência indutiva de carga tradicional é baseada na indução de um campo magnético variável que fornece energia elétrica de uma bobina primária (transmissora de energia) para uma bobina secundária (receptora de energia), conforme mostrado nas Figuras

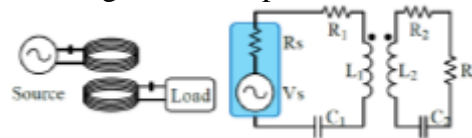
12, 13 e 14 que mostram as tipologias de circuitos RL e RLC que são empregadas nessa tecnologia.

Figura 12 - Transferência de energia indutiva tradicional



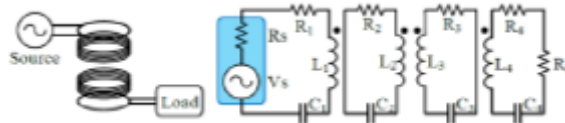
Fonte: QIU *et al.*, 2013

Figura 13 - Transferência de energia indutiva por ressonância magnética acoplada



Fonte: QIU *et al.*, 2013

Figura 14 - Transferência de energia sem fio por ressonância magnética fortemente acoplada



Fonte: QIU *et al.*, 2013

A ressonância magnética acoplada é uma tecnologia WPT de campo próximo que possui algumas diferenças em relação ao IPT tradicional, conforme mostrado nas Figuras 12, 13 e 14. Na RIPT são utilizados dois ou mais pares de capacitores empregados em um circuito RLC para aumentar a eficiência da transferência de energia e o alcance da transferência que possibilita um maior espaço entre os entreferos. Os capacitores de compensação do lado primário e secundário podem ser conectados em série ou em paralelo, resultando na possibilidade de quatro projetos diferentes. Geralmente, a compensação realizada do lado primário almeja diminuir a potência reativa e a compensação do lado secundário visa que a carga adquira o máximo da potência transferida, aumentando a capacidade de transferência de energia (QIU *et al.*, 2013).

A escolha da topologia dos circuitos é realizada de acordo com a finalidade da aplicação. A utilização de capacitores em série do lado secundário é adequada para aplicações de tensão constante, enquanto a topologia paralela é capaz de suportar uma corrente constante. Já para o lado primário, a configuração em série pode reduzir a tensão da fonte de alimentação, enquanto a topologia paralela é capaz de suportar uma grande corrente de alimentação (QIU *et al.*, 2013).

No sistema RIPT os dispositivos que realizarão o abastecimento do VE são chamados de acopladores magnéticos e são partes básicas e necessárias ao funcionamento do sistema. Os acopladores magnéticos são compostos por uma bobina transmissora, uma bobina receptora e por uma blindagem. As bobinas trocam energia através do ar e a blindagem controla a distribuição do fluxo de energia (MAHESH; CHOKKALINGAM; MIHET-POPA, 2021).

A blindagem pode ser projetada para ser implementada de quatro formas: blindagem passiva; blindagem passiva condutiva; blindagem ativa; e blindagem reativa.

Para que ocorra a redução ou até mesmo o bloqueio do fluxo de fuga, a blindagem passiva adiciona componentes passivos ao sistema e é feita a partir de materiais não condutores e de alta permeabilidade para que o fluxo seja direcionado em um determinado caminho, aumentando o desempenho do sistema, mas causando aumento de peso, uma vez que a blindagem deve ser realizada na bobina secundária instalada no veículo, e custo (CAMPI, CRUCIANI e FELIZIANI, 2014; MOHAMMAD *et al.* 2019).

A blindagem passiva condutiva se baseia na lei de Faraday e Lenz. Se um material condutor for colocado na presença de um fluxo de campo magnético variante, será induzido no material uma corrente elétrica (lei de Faraday) e um novo campo magnético oposto ao campo original é formado a partir da corrente induzida e tenta anular o aumento do fluxo original (lei de Lenz). A tentativa de anulação do campo original que é formado pela bobina primária ajuda a diminuir o fluxo que pode ir para fora do sistema, essa estratégia é chamada de blindagem condutiva e possui como desvantagem a falta de controle sobre as correntes induzidas e no campo magnético que pode ser gerado no material condutor (MAHESH; CHOKKALINGAM; MIHET-POPA, 2021).

A blindagem ativa é aplicada em sistemas de alta potência. Nesse caso, são incrementadas voltas extras em direção contrária na bobina para se criar um campo magnético na direção contrária do campo original para minimizar o campo de fuga (CAMPI *et al.* 2019). Já na blindagem reativa são adicionados elementos reativos como capacitores e espiras no sistema e a corrente induzida nesses elementos a partir do campo original cria um campo magnético que se opõe ao fluxo de fuga (ASA *et al.* 2020).

Segundo Mahesh, Chokkalingam e Mihet-Popa (2021), o método de blindagem passiva é o mais eficaz em sistemas IPT de baixa e média potência, são mais baratos, mais fácil de implementar e mais robustos. Para sistemas IPT de alta potência, as blindagens ativas e reativas são mais indicadas.

Segundo Kim *et al.* (2001), inicialmente as estruturas tradicionais utilizadas em transformadores foram cogitadas para serem também implementadas nos acopladores

magnéticos para aplicação veicular, mas, devido ao alto custo, à fragilidade, ao peso e à sensibilidade em relação ao alinhamento necessário para a troca de energia, a estrutura tradicional foi substituída por uma configuração mais semelhante a uma almofada, conforme mostra a Figura 15, onde é exibida a estrutura de um acoplador da Evatran, empresa norte americana que atua na indústria de infraestrutura para VE.

Figura 15 - Carregamento sem fio estacionário da Evatran



Fonte: ZHAO *et al.*, 2018

De acordo com Mahesh, Chokkalingam e Mihet-Popa (2021), essas almofadas são geralmente compostas por fios *litz* para redução de perdas por efeito pelicular, além de também serem utilizados núcleos de ferrite para uma adequada orientação do fluxo, aumentando, assim, a indutância mútua e minimizando o vazamento de fluxo, fornecendo também, portanto, uma blindagem para troca de energia.

A frequência de operação e a potência da transferência de energia indutiva tradicional estão, respectivamente, na faixa de kHz e em altos níveis de kW. A distância de carregamento efetiva geralmente é inferior a 20 cm devido ao seu baixo alcance. Por outro lado, o carregamento por ressonância magnética oferece maior eficiência e uma necessidade de alinhamento de posição menos precisa do transmissor de carregamento e do receptor do veículo em comparação com a tecnologia tradicional de transferência de energia indutiva. A frequência de operação do carregamento de ressonância magnética atual para veículos elétricos varia de 20 kHz a 140 kHz. Em comparação com a transferência de energia indutiva convencional, a tecnologia de ressonância magnética acoplada pode transferir energia em lacunas maiores com eficiência de mais de 90%. Portanto, o modelo de ressonância magnética acoplada é amplamente adotado para aplicações de carregamento indutivo estacionário e dinâmico (ZHAO *et al.*, 2018).

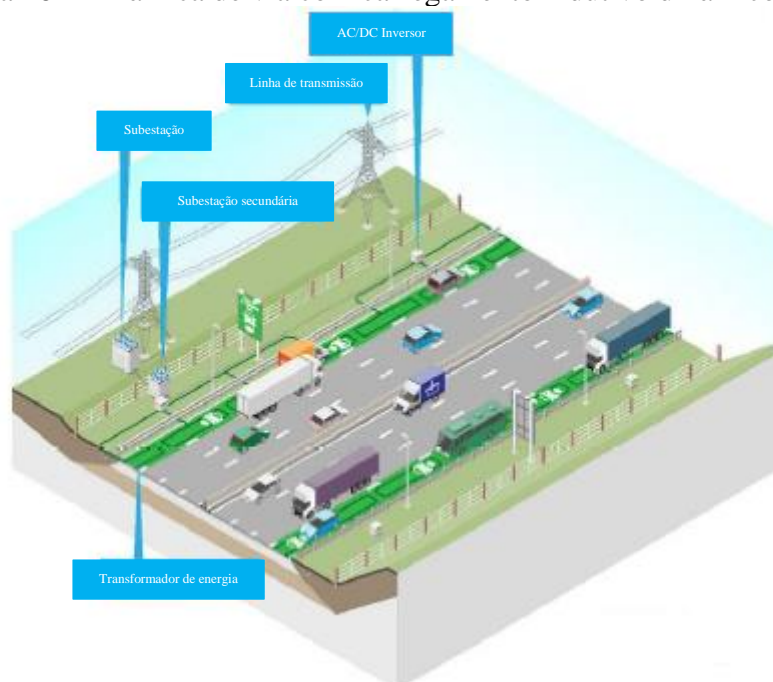
### 3.2.1.2 Carregamento indutivo sem fio dinâmico

O carregamento indutivo sem fio dinâmico, que pode também ser chamado de veículos elétricos *on-line*, do inglês *Online Electric Vehicles* (OLEV), é uma maneira de realizar a recarga do veículo elétrico enquanto o veículo está se movendo (SUNGWOO *et al.*, 2010). Acredita-se que o carregamento dinâmico é uma forma de resolver o dilema de autonomia dos VE, que atualmente é o principal fator limitante da tecnologia.

O sistema de fornecimento de energia para o modelo dinâmico contém subestações de transmissão fora da estrada; subestações e inversores à beira da estrada; e acopladores de transferência de energia incorporados sob a estrada divididos em diversos segmentos. O inversor fornece energia de corrente alternada de alta frequência (20 kHz – 140 kHz). Os veículos preparados para realização do carregamento indutivo se comunicam com os inversores que, por sua vez, excitam apenas o segmento da estrada em que o veículo em questão está localizado. Esses segmentos da bobina primária devem ser ligados sequencialmente em sincronismo com a passagem da bobina secundária do veículo. Esse gerenciamento de energia reduz perdas de energia e evita a exposição regular de veículos e humanos a campos eletromagnéticos de alta frequência que variam no tempo (QIU *et al.*, 2013; SHIN *et al.*, 2014; MILLER *et al.*, 2015).

A Figura 16 ilustra a dinâmica explicada por meio de uma seção de uma via eletrificada com carregamento indutivo dinâmico. Nela, é possível identificar as subestações primárias e secundárias para o fornecimento de energia, os inversores e também as faixas da estrada que são eletrificadas.

Figura 16 - Dinâmica de via com carregamento indutivo dinâmico

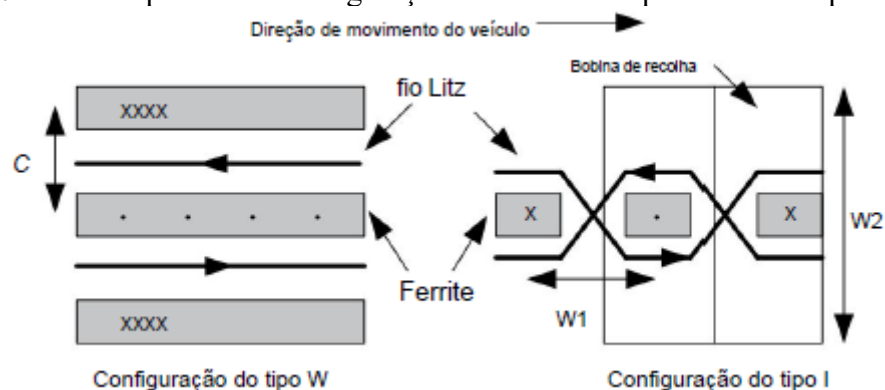


Fonte: Adaptado de ZHAO *et al.*, 2018

No momento em que um veículo elétrico percorre essa estrada eletrificada, a energia alternada pode ser transferida e ambas as bobinas, primária e secundária, são sintonizadas para frequência de ressonância, transferindo, portanto, uma potência de alta frequência do primário para o secundário. A energia alternada recebida é ainda retificada e regulada para alimentar o motor do veículo e/ou para carregar a bateria integrada (SHIN *et al.*, 2014).

As ferrites inseridas ao longo da estrada podem estar dispostas de forma simples como trilhos com apenas duas linhas ou de acordo com dois modelos: em “I” ou em “W”, que podem aumentar o poder de acoplamento, maximizando, por sua vez, também a distância de transferência de potência. A Figura 17 mostra as diferenças entre os modelos indicados. Para o modelo “W”, a área de distribuição da ferrite determina a distância que pode ser realizada a transferência de energia, bem como a possibilidade de deslocamento lateral. Para a configuração do tipo “I”, o polo magnético se alterna junto com o percurso da estrada e a largura indicada como “W1” pode ser otimizada, de acordo com o projeto, para se obter o melhor acoplamento possível, já a largura “W2” é projetada para atender ao requisito de desalinhamento lateral (MI; MASRUR, 2018).

Figura 17 - Vista superior das configurações de trilho do tipo “W” e do tipo “I”



Fonte: Adaptado de MI; MASRUR, 2018

O movimento relativo entre as bobinas primária e secundária tem um impacto significativo na transferência de potência no carregamento indutivo dinâmico, de forma que é possível alcançar 100% de transferência de energia quando a bobina primária e a bobina secundária estão totalmente alinhadas e somente 50% da energia total pode ser transferida quando a bobina secundária está entre duas bobinas primárias. Essa variabilidade de potência acontece durante a passagem do veículo sobre bobinas embutidas no asfalto e gera impacto na estabilidade da rede e, para minimização do impacto, pode-se instalar bancos de capacitores próximos aos inversores ou utilizar uma configuração de bobinas primárias sobrepostas, aumentando os custos para implementação do sistema (MILLER *et al.*, 2015).

### 3.2.1.3 Status Atual

Nos últimos anos, diversas empresas e centros de pesquisa investiram em tecnologias para lançar veículos com menores emissões de GEE e propuseram sistemas IPT/RIPT próprios para melhoria da mobilidade e autonomia dos veículos elétricos. A WAVE, por exemplo, é uma *startup* que nasceu dentro da universidade de Utah e que comercializa uma tecnologia IPT própria para recarga de ônibus, carros e caminhões elétricos. O primeiro protótipo da WAVE foi implementado em um ônibus do campus e o sistema permitia a transferência de 25 kW a 20 kHz em cada ponto de ônibus, a transferência de potência ocorria em um entreferro de 15 a 25 cm, com uma eficiência de 90% (CIRIMELE; DIANA; FRESCHI, 2018).

Com um número significativo de sistemas de carregamento sem fio de alta potência implantados, a WAVE está permitindo que operadores de frotas comerciais ampliem sua gama de veículos elétricos. Seus sistemas variam de 125 a 500 kW e ainda há um carregador de 1

MW em desenvolvimento (WAVE INC., 2021). Na Figura 18 é possível verificar os produtos finais comercializados pela WAVE, que consistem em seu ônibus elétrico e a base para realização da recarga sem fio.

Figura 18 - Ônibus e carregador elétrico da WAVE



Fonte: WAVE INC., 2021

Em 2012, a Bombardier anunciou na Alemanha seu conjunto de soluções para sistemas de transferência indutivo de energia estacionário e dinâmico denominado PRIMOVE. A implantação da tecnologia para ônibus elétrico está em andamento nas cidades de Mannheim e Berlim, na Alemanha, e Bruges, na Bélgica, e possui uma potência de até 200 kW. O sistema PRIMOVE da Bombardier também foi demonstrado em operação em uma linha de metrô leve em Augsburg na Alemanha. Em 2013, a Bombardier e a Scania testaram o carregamento de energia indutivo para veículos pesados de longa distância no projeto *Slide-in Electric Road System-Induction*. Na Figura 19 é possível visualizar um caminhão da Scania equipado com o sistema da Bombardier e um segmento de pista teste que foi desenvolvida para verificar a funcionalidade e os custos de infraestrutura da tecnologia. Foi construída uma pista de teste de



300 m, contendo quatro segmentos de rodovia de 20 m equipados com o sistema de carregamento. O caminhão híbrido tem um motor elétrico de 120 kW e uma bateria de 100 kWh. O sistema de recarga indutivo dinâmico demonstrou ser capaz de fornecer 200 kW em um entreferro de 85 mm ou 100 mm e com eficiência de até 90% (ZHAO *et al.*, 2018; CIRIMELE; DIANA; FRESCHI, 2018).

Figura 19 - Teste do sistema da Bombardier em caminhão da Scania



Fonte: ZHAO *et al.*, 2018

O Instituto Avançado de Ciência e Tecnologia da Coreia (KAIST) desenvolveu um sistema RIPT dinâmico que está em funcionamento desde 2009. A tecnologia implementada utiliza uma grande quantidade de ferrite para confinar o fluxo dentro de um caminho fechado bem definido, conforme mostrado na Figura 20. Esse sistema foi aplicado a um ônibus OLEV em 2011 nos campuses da KAIST nas cidades de Daejeon e Gumi, ambas localizadas na Coreia do Sul (SUH, 2011).

Figura 20 - Trilha de ferrite do sistema OLEV embutida na estrada



Fonte: Adaptado de CIRIMELE; DIANA; FRESCHI, 2018

O sistema desenvolvido pela KAIST é composto por um estágio de conversão de energia que ocorre à beira da estrada. A energia recebida da rede elétrica é retificada e alimenta os transmissores de energia que estão enterrados a uma frequência de 20 kHz. Os ônibus OLEV possuem baterias pequenas e recebem 100 kW com uma eficiência máxima de transmissão de potência de 85% com um entreferro de 17 cm. As seções de estradas eletrificadas são separadas dos carros comuns e a alimentação só é fornecida quando os barramentos eletrificados dos ônibus passam, evitando a exposição ao campo magnético de alta frequência de outros veículos e diminuindo também o desperdício de energia (AHN e KIM, 2011; ZHAO *et al.*, 2018).

A Figura 21, mostra em uma visão mais ampliada a estrutura implementada abaixo da estrada para estabelecimento da tecnologia e um ônibus OLEV operando sobre a estrutura já pronta.

Figura 21 - Construção e operação do sistema de carregamento indutivo dos ônibus OLEV



Fonte: Adaptado de ZHAO *et al.*, 2018

O sistema OLEV possui ainda uma complexa solução de blindagem ativa e passiva que é instalada nos barramentos anexados aos ônibus para melhoria da compatibilidade eletromagnética e redução das emissões de campo magnético. Na Figura 22 é possível verificar um esquema de blindagem em que são utilizadas escovas trançadas de cobre para criação de uma blindagem passiva fechada aplicada aos ônibus eletrificados (AHN e KIM, 2011).

Figura 22 - Ilustração de blindagem passiva aplicada ao ônibus OLEV



Fonte: AHN e KIM, 2011

O instituto de pesquisa francês VEDECOM e seus parceiros iniciaram em 2014 o projeto FABRIC. O objetivo do projeto era avaliar a viabilidade de diferentes tecnologias de carregamento de VE em estrada para extensão da frota desses veículos e verificar também os investimentos necessários para expansão da tecnologia em larga escala. O projeto implementou um protótipo de infraestrutura de carregamento sem fio de até 20 kW e alcançava uma eficiência de 70% (LAPORTE *et al.*, 2019).

Na Figura 23 é possível verificar o primeiro protótipo do sistema de bobina transmissor embutido na estrada utilizado para testar as primeiras versões do sistema de recarga e o sistema de instrumentação veicular utilizado para os testes.

Figura 23 - Modelo implementado para testes da FABRIC



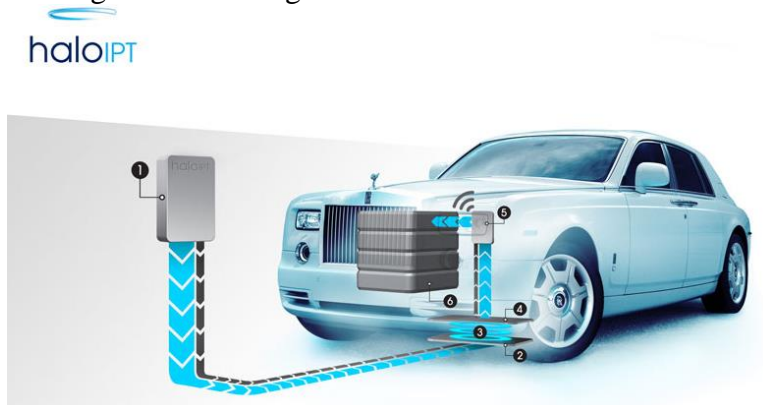
Fonte: LAPORTE *et al.*, 2019

No segmento de tecnologia para carregamento IPT estático é possível citar a tecnologia da HaloIPT, empresa criada na Universidade de Auckland na Nova Zelândia que foi adquirida pela Qualcomm em 2011. A HaloIPT desenvolveu soluções para carregamento estático em uma faixa de potência de 3 a 20 kW e se tornou parceira da grande marca automotiva Rolls Royce para implementação dessa tecnologia no modelo Phantom da marca (QUALCOMM INCORPORATED, 2011).

Em março de 2011 a Rolls Royce exibiu o seu primeiro modelo de veículo elétrico que utilizava a tecnologia da HaloIPT chamado de *102EX Phantom Experimental Electric Car*. Já em 2019, a HaloIPT foi novamente adquirida, dessa vez pela WiTricity, empresa do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT). A WiTricity agora recebe investimentos de marcas como Toyota, Mitsubishi, Intel, Foxconn, entre outras empresas (HAWKINS; ELLIS, 2022).

Na Figura 24, é possível verificar uma ilustração da tecnologia da HaloIPT aplicada ao modelo Phantom da Rolls Royce e, como se pode observar, a recarga é realizada de forma estática.

Figura 24 - Carregamento estático HaloIPT



Fonte: Arup (2019). Disponível em: <https://www.arup.com/projects/haloipt>

Um outro carregador sem fio no mercado é o Plugless da Evatran. Os modelos Plugless desenvolvidos possuem uma potência de 3,3 kW e foram projetados para serem aplicados ao Nissan Leaf, Chevrolet Volt e Cadillac ELR. A Bosch, em parceria com a Evatran, também está oferecendo um sistema sem fio com 6,6 kW. O Oak Ridge National Laboratory demonstrou um sistema de carregamento indutivo de 20 kW com 90% de eficiência e planeja construir um protótipo de sistema de 50 kW (ZHAO *et al.*, 2018).

### 3.2.1.4 Custo

O custo estimado para preparo da infraestrutura de um sistema de carregamento indutivo consiste nas linhas de alimentação utilizadas, nas subestações que deverão ser implementadas, além de também ser possível incorrer em custos com equipamentos de proteção passiva e, até mesmo, adaptações estruturais na estrada (GUSTAVSSON; HACKER; HELMS, 2019). Segundo BATEMAN *et al.* 2018, para instalação das tecnologias OLEV e Primove os custos estimados foram de:

- 500 k€ por quilômetro de pista, para o sistema OLEV;
- 3,36 a 6,15 M€ por quilômetro de pista para o sistema Primove.

Conforme aponta o estudo de viabilidade da *Highways England* (2015), considerando diferentes condições de tráfego e, assumindo um cenário determinado de inclusão de veículos e da tecnologia de carregamento indutivo, a demanda média diária de energia para suprir o sistema pode chegar a 312,5 kVA/km, podendo atingir uma demanda máxima de energia diária que varia de 2,5 a 2,8 MVA/km. Com base no cenário de demanda indicado, o estudo de viabilidade da *Highways England*, estima um custo de infraestrutura que pode variar de 350 a 425 k€/km.

Um estudo realizado pela Universidade de Tecnologia da Delf aponta que o custo de infraestrutura de carregamento condutivo dinâmico varia em uma faixa de 300-500 k€ por quilômetro, sendo que a instalação veicular do sistema e qualquer outro ajuste necessário estão excluídos desse levantamento (ZHAO *et al.*, 2018). Por outro lado, segundo Fuller (2016), as estimativas de custo existentes da infraestrutura de carregamento indutivo dinâmico estão entre 1,5 M€ e 2,1 M€ por quilômetro de pista, sendo que em um estudo mais conservador foi indicado um custo de 2,6 M€/km.

Além dos investimentos com infraestrutura de um sistema rodoviário eletrificado, as baterias de íon de lítio necessárias para operação dos veículos também precisam ser englobadas na análise de custos da implantação da tecnologia. Segundo Coban, Rehman e Mohamed (2022), o custo dessas baterias está atualmente por volta de 180-310 € por kWh, com inovações em otimização de energia e nas próprias baterias, estima-se que esse custo passe a ser de 100 € no futuro.

ZHAO *et al.* (2018) destaca que os custos com infraestrutura para um sistema de carregamento dinâmico indutivo variam de acordo com os picos de tráfego, tipos de veículos, demandas de carregamento, cobertura de eletrificação rodoviária etc. Os picos de demanda de energia determinam o custo de instalação da fonte de alimentação, já o custo de instalação da

infraestrutura rodoviária propriamente dita é determinado pela demanda de energia e pela cobertura de eletrificação da estrada, sendo que a instalação rodoviária é responsável pela maior parte desse custo.

Já em relação aos custos atrelados ao carregamento indutivo estacionário, pode-se destacar que é possível encontrar estações de carregamento sem fio ao preço de US\$ 1.260 para um sistema de 3,6 kW; US\$ 3.000 para um sistema de 6,6 kW; e US\$ 3.420 para um sistema de 7,2 kW. Destaca-se que o custo médio do carregamento sem fio estacionário varia entre US\$ 350/kW - US\$ 475/kW (HAWKINS; ELLIS, 2022).

### 3.2.1.5 Desafios

Segundo BATEMAN *et al.* 2018, há uma série de barreiras tecnológicas que precisam ser superadas para que o carregamento indutivo dinâmico se torne viável e possa ser aplicado em larga escala. Os seguintes pontos foram identificados pelos principais fabricantes da tecnologia:

- Problemas de sincronização entre a bobina de abastecimento primária e o sistema de bordo dos veículos, uma vez que essa sincronização é afetada principalmente pela velocidade do veículo, alinhamento entre as bobinas primária e secundária e velocidade de comunicação. Destaca-se que todos os pontos citados podem afetar a taxa de transferência de energia e a eficiência geral do sistema;
- Necessidade de melhorias para aumentar a potência de alimentação dos sistemas para veículos pesados, uma vez que a potência de alimentação mais comum dos sistemas atuais é de aproximadamente 20 kW, que é mais apropriada para veículos leves;
- Necessidade de melhoria da quantidade de veículos que uma única faixa eletrificada é capaz de recarregar. Destaca-se que esse fator está relacionado com a sincronização e a velocidade de comunicação das bobinas;
- Necessidade de universalizar o sistema de carregamento de eletrificação das rodovias, objetivando diversificar os veículos e as marcas de tecnologias que podem ser recarregados na mesma pista;
- Problemas de flutuação de energia que o sistema de carregamento indutivo poderá introduzir na rede, podendo gerar impactos na estabilidade da mesma;

- Integração da infraestrutura da rodovia eletrificada com as manutenções periódicas das rodovias;
- Problemas com geração de harmônicos injetados na rede pela característica indutiva do sistema.

Os desafios apontados precisam ser estrategicamente discutidos e solucionados antes que a tecnologia de carregamento indutivo possa ser implementada em larga escala nas rodovias. Considerando o estágio dos projetos indicados na seção anterior, é provável que ainda leve um determinado tempo até que a tecnologia possa ser lançada, implementada e utilizada pelo sistema rodoviário de cargas.

### **3.3 Carregamento condutivo a catenária**

O sistema de cabos com catenárias aéreas tem sido, por muitos anos, amplamente utilizado para mobilidade, conforme mencionado no início deste capítulo, nos trólebus devido à sua alta eficiência.

A tecnologia implementada nos trólebus consiste na implementação de um pantógrafo permanentemente conectado a cabos aéreos. O conceito da eletrificação das rodovias para utilização de catenárias elétricas aéreas aplicadas aos caminhões é, essencialmente, uma evolução da engenharia aplicada aos trólebus.

O sistema de catenária elétrica consiste em uma infraestrutura de suporte construída em rodovias e/ou vias urbanas para implementação de cabos elétricos (cabos de catenária) que alimentam um sistema elétrico captado por caminhões através de um coletor pantográfico automatizado inserido no teto do veículo (AINALIS; THORNE; CEBON, 2020).

A Figura 25 exibe uma rodovia eletrificada por meio do sistema de catenárias aéreas na Alemanha, e mostra também um caminhão da Scania equipado com a tecnologia de coletor pantográfico da Siemens.



Figura 25 - Caminhão Scania equipado com tecnologia da Siemens em rodovia da Alemanha



Fonte: Adaptado de Ainalis, Thorne e Cebon (2020)

Segundo Ainalis, Thorne e Cebon (2020), a transmissão condutiva aérea aplicada pelos sistemas de catenária é a única alta tecnologia atual de prontidão e com maior capacidade de expansão que utiliza práticas maduras e seguras de implementação de vias eletrificadas para garantir um fornecimento de energia confiável e estável para os veículos. Esse fornecimento de energia é realizado por meio de subestações de média tensão, transformadores de potência, retificadores e inversores controlados e também são capazes de receber energia elétrica gerada pelo sistema de frenagem regenerativa dos caminhões.

O sistema mais viável e com maior escalabilidade é chamado de *eHighway* e é desenvolvido pela Siemens, uma vez que a empresa é considerada pioneira no estudo e implementação dessa tecnologia, tendo já conseguido desenvolver um sistema com forte histórico de segurança e com alta eficiência energética, sem comprometer a estrutura das estradas, reduzindo também a quantidade de manutenções (BATEMAN *et al.*, 2018).

Esta sessão se dedica a fornecer uma maior elucidação sobre o sistema *eHighway* desenvolvido pela Siemens, trazendo uma breve revisão sobre a tecnologia, os custos de implementação e os maiores desafios identificados até o momento.

### 3.3.1 *eHIGHWAY*: O Sistema Siemens

Em 2010 a Siemens iniciou o projeto ENUBA para proporcionar eletro mobilidade em veículos comerciais pesados para redução de impacto ambiental em áreas com grande densidade



demográfica (GERTENSBERG; LEHMANN; ZAUNER, 2012). O sistema era financiado em conjunto com o governo alemão e visou os veículos pesados denominados de *eTrucks*, por meio de sistemas híbridos. Os *eTrucks* possuem um dispositivo em sua carroceria chamado de pantógrafo para captar energia de uma linha aérea fixada acima da estrada, esta denominada de catenárias (SACHSE *et al.*, 2014).

O conceito de uma *eHighway* ainda está em fase de desenvolvimento, sendo que os componentes mais básicos e cruciais que suportam a infraestrutura da rodovia eletrificada por essa tecnologia consistem em: subestações de tração; cabos de alimentação da subestação; linhas de catenárias aéreas; e os veículos propriamente ditos.

### 3.3.1.1 Subestações de Tração

Para garantir o fornecimento de energia necessário às linhas de catenária, transferindo-a, posteriormente, para os caminhões, diversas subestações, denominadas de subestações de tração, devem ser instaladas ao longo da rodovia para desempenhar o papel de conversão da eletricidade e tornar os níveis de tensão adequados para funcionalidade do sistema antes de serem disponibilizados para os veículos. Na Figura 26 é possível verificar uma subestação de tração da Siemens.

Figura 26 - Subestação de tração



Fonte: PLOUGMANN; KVIST; VAERBAK, 2017

Segundo Plougmann, Kvist e Vaerbak (2017), os níveis de tensão atuais dos *eTrucks* são limitados na faixa de tensão de 500 V a 600 V. Nesse sentido, a tensão de saída das subestações deve ser ajustada para fornecer o nível de tensão de operação dos caminhões,

considerando também um acréscimo de 10% para compensação de perdas ôhmicas e de quedas de tensão nos cabos de transmissão.

As subestações, além de promoverem a redução dos níveis de tensão do sistema de média tensão trifásico para níveis operacionais de uma *eHighway*, também convertem a energia CA do sistema elétrico para uma saída CC de dois polos.

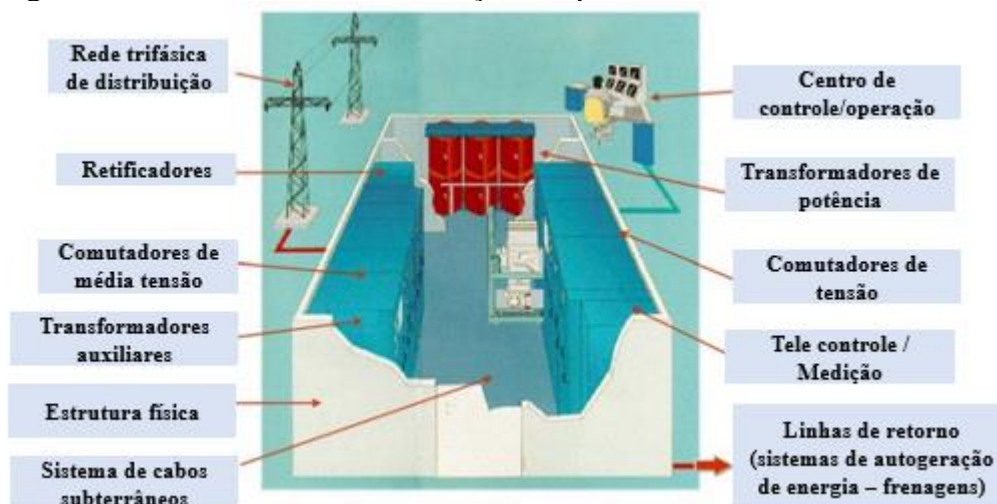
Essa conversão acontece para reduzir as distâncias de isolamento dos cabos, tornando mais seguro e facilitando o uso do sistema em áreas e ruas povoadas, e para diminuir a complexidade de construção dos veículos, retirando a necessidade de um sistema de conversão de energia nos caminhões, deixando os *eTrucks* mais leves e baratos (SIEMENS AG. ENUBA, 2012).

Por outro lado, a utilização de um sistema CC para transferência de energia nos cabos de catenária torna as quedas de tensão nas linhas ligeiramente maiores do que em um sistema AC, devido à alta corrente elétrica utilizada na distribuição, fazendo com que seja necessário a implementação de maiores quantidades de subestações em uma *eHighway*. Além disso, a utilização de sistema DC também eleva o custo e a complexidade das subestações (SIEMENS AG. ENUBA, 2012).

Porém, segundo Plougmann, Kvist e Vaerbak (2017) a solução AC é adequada para sistemas de tração de alta tensão, maiores do que os que são utilizados pelos veículos de carga, como em trens, enquanto a solução DC é mais adequada para sistemas de níveis de tensão mais baixos aos quais se aplicam os *eTrucks*.

A Figura 27 mostra a estrutura de uma subestação compacta para rodovias DC. É possível perceber que o *design* é otimizado e permite a integração de todos os componentes em um único contêiner.

Figura 27 - Estrutura de uma subestação DC para sistemas de catenária



Fonte: Adaptado de Siemens AG. ENUBA, 2012

O núcleo da subestação CC consiste em uma combinação de transformador-retificador, que retifica a corrente trifásica do lado primário para uma corrente contínua do nível de tensão desejado. Para retificação são utilizados diodos implementados em circuitos em série ou paralelo de pontes de 6 pulsos (BIESENACK, 2006).

Durante a operação do sistema e, principalmente, a plena carga, a tensão na subestação cai devido às quedas de tensão na unidade transformador-retificadora, de modo que há menos reservas disponíveis para as quedas de tensão que ocorrem na rede catenária. Este efeito é compensado pela utilização de componentes eletrônicos de potência controláveis, como os tiristores, nos retificadores, garantindo uma alta tensão estável na subestação mesmo em plena carga, ajudando a reduzir as perdas de transmissão e permitindo ganhos nas distâncias entre as subestações (BIESENACK, 2006).

As subestações ainda podem ser equipadas com inversores para conversão de corrente contínua em corrente trifásica para alimentar de volta a rede elétrica que fornece energia para o sistema, uma vez que existem veículos modernos que convertem a energia mecânica de volta em energia elétrica durante a frenagem e em declives, alimentando de forma reversa a rede de catenárias (SIEMENS AG. SITRAS TCI, 2008; SIEMENS AG. SITRAS SES/MES, 2008).

### 3.3.1.2 Pantógrafo

O pantógrafo é o dispositivo acoplado ao caminhão responsável por realizar o contato com a catenária e fornecer, portanto, energia elétrica da linha aérea para o veículo.

A Siemens desenvolveu sistemas condutores de catenária dinâmicos. Os cabos aéreos são suportados por mastros cantiléver que ficam alocados à beira da estrada. Uma vez que o veículo detecta a presença de uma instalação, seu pantógrafo se estende do teto para se conectar aos cabos eletrificados. Atualmente, existem sistemas que são capazes de fornecer 500 kW de potência com uma eficiência de, aproximadamente, 85% em velocidades de até 80 km/h, sendo que há sistemas com 200kW testados com eficiência de 90-97% a 90 km/h (BATEMAN *et al.*, 2018).

Os pantógrafos podem ser desligados de forma instantânea, deixando os veículos livres para entrar e sair da pista de carregamento da forma que for mais conveniente para o condutor.

Segundo Bateman *et al.* (2018), a orientação mecânica do pantógrafo é dada pelas catenárias aéreas e pela pista. Dessa forma, os pantógrafos, portanto, podem ser movidos apenas na direção vertical para estabelecer contato com a catenária, impondo força de contato suficiente para captação de energia. Além disso, possuem polos duplos na maioria dos sistemas atuais para garantir o fluxo de energia reversa, do caminhão para a rede.

De acordo com Mouli *et al.* (2018), os pantógrafos utilizados em sistemas de caminhões operam em velocidade abaixo de 200 km/h e, para desempenhar o seu papel, utilizam molas, para proporcionar a articulação do equipamento e proteger contra vibrações, e um cilindro de ar que atua como ar comprimido para levantar ou abaixar o pantógrafo. Para tocar as catenárias o pantógrafo move o pistão do cilindro de ar para frente e puxa a haste de controle. Em seguida, as molas assumem o comando e levantam o cabeçote do pantógrafo para entrar em contato com o fio, através de uma alavanca. Ao fim da alimentação elétrica do veículo, o objetivo do cilindro de ar é comprimir a mola para baixo para recolher o pantógrafo, acionando novamente a mola para abaixar o cabeçote do dispositivo.

Os pantógrafos possuem ainda um sistema de amortecedores para fornecer um melhor controle para realizar o movimento de subida e descida. Além disso, também contam com sensores projetados exclusivamente para que o dispositivo altere seu ponto de contato com a linha, neutralizando os movimentos laterais que o veículo faça na pista e ajudando na redução do desgaste do sistema (MOULI *et al.*, 2018).

### **3.3.1.3 Catenárias**

As catenárias são necessárias para fornecer e, em alguns casos, devolver energia elétrica para a rede ou para os veículos. Nesse sentido, a tração elétrica está sendo, há mais de 100 anos, estudada e testada para aplicação no transporte ferroviário ou de longa distância. Nesse

contexto, já em 1960, a Siemens apresentou linhas aéreas que podem fornecer eletricidade aos veículos que se movem com até 200 km/h, com essa tecnologia sendo desenvolvida até os dias atuais quando já se encontra linhas aéreas para velocidades superiores a 300 km/h (SIEMENS AG. ENUBA, 2012).

O sistema desenvolvido pela Siemens não causa impacto direto ao pavimento da rodovia, uma vez que todos os componentes do sistema estão acima ou na beira da estrada. Os cabos são suspensos a uma altura que varia entre 5 e 6 m acima da superfície, o que significa que este sistema é adequado apenas para caminhões ou ônibus (BATEMAN *et al.*, 2018).

Os cabos utilizados nos sistemas de catenárias, costumam ser divididos em duas categorias: cabos alimentadores; e cabos aéreos.

Os cabos alimentadores existem para fornecer a energia da subestação de tração para as duas linhas aéreas. Dessa forma, para cada subestação, deve ser instalado quatro pares de cabos alimentadores, sendo dois pares para cada sentido da via, resultando em um total de oito cabos para cada *eHighway*. Já os cabos aéreos constituem a última etapa do sistema antes que a entrega de energia seja, de fato, realizada para os veículos. As linhas são suspensas em pares e representam as resistências que mais contribuem para queda de tensão do sistema (PLOUGMANN; KVIST; VAERBAK, 2017).

### **3.3.2 Status Atual**

A tecnologia de catenária aérea, desenvolvida pioneiramente pela Siemens, é considerada madura e bem desenvolvida, conforme indicado anteriormente. Um sistema de carregamento de veículos eficiente e maduro combinado com uma estratégia assertiva e uma boa logística pensada para o transporte rodoviário, pode tornar o transporte de cargas pesadas mais sustentável e eficaz.

A Siemens já desenvolveu projetos de demonstração do sistema *eHighway* em rodovias públicas de países como a Alemanha, Suécia e Estados Unidos, por meio da utilização de caminhões com tecnologia híbrida de marcas como a Volvo e Scania (SIEMENS MOBILITY, 2021). Esta subseção se dedicará a mostrar os exemplos dos sistemas *eHighway* testados nos países indicados.

#### **3.3.2.1 *eHighway* na Alemanha**

No ano de 2017, a Siemens foi contratada pelo governo alemão para construir um sistema de catenárias aéreas em um trecho de 10 quilômetros, destinado aos caminhões que realizam transporte de carga no país. A estrada que recebeu a infraestrutura está localizada na rodovia federal A5, entre o entroncamento *Zeppelinheim/Cargo City Süd* no Aeroporto de Frankfurt e o entrocamento *Darmstadt/Weiterstadt*. O sistema foi construído como parte do projeto conjunto ELISA (*Electrified, innovative heavy freight transport on autobahns* ou, em tradução livre, Transporte de carga pesada eletrificado e inovador em autoestradas) do BMUB (*Germany's Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety* ou, em tradução livre, Ministério Federal do Meio Ambiente, Conservação da Natureza, Construção e Segurança Nuclear da Alemanha) (SIEMENS MOBILITY, 2017).

Uma segunda *eHighway* de 18 quilômetros foi finalizada em 2021 na Alemanha. O projeto nasceu de um consórcio entre a Siemens e a SPL *Powerlines Germany* e foi implementado na rodovia B462 que fica entre as cidades de *Kuppenheim* e *Gaggenau* (ROAD TRAFFIC TECHNOLOGY, 2021).

Ainda na Alemanha, um projeto também está sendo testado na rodovia federal A1. A rodovia está localizada entre o entroncamento de *Reinfeld* e o trevo de *Lübeck* e possui 5 quilômetros de extensão (ROAD TRAFFIC TECHNOLOGY, 2021).

Os três projetos citados possuem atualmente 15 caminhões híbridos em operação, sendo 5 caminhões associados a cada projeto citado. A NPM (*The National Platform for the Future of Mobility* ou, em tradução livre, Plataforma Nacional para o Futuro da Mobilidade) sugeriu a instalação de linhas aéreas em 300 km de autoestradas na Alemanha até 2023, eletrificando um total de 4.000 km até o final de 2030. Espera-se que a medida ajude o país a cumprir sua meta de reduzir as emissões de gases de efeito estufa no setor de transporte em até 40%, conforme a Lei de Proteção Climática Alemã de junho de 2021 (JÖHRENS et al., 2022).

Na Figura 28, é possível verificar um exemplo do projeto ELISA implementado próximo ao aeroporto de *Frankfurt*. Na figura é possível ver um caminhão da Scania com o sistema de pantógrafo equipado e as catenárias aéreas implementadas por postes alocados ao lado da rodovia.

Figura 28 - eHighway do projeto ELISA



Fonte: SIEMENS MOBILITY, 2017

### 3.3.2.2 eHighway nos Estados Unidos e Suécia

Também em 2017, a Siemens e o SCAQMD (*South Coast Air Quality Management District* ou, em tradução livre, Distrito de Gestão da Qualidade do Ar da Costa Sul) realizaram uma demonstração da tecnologia eHighway em uma rodovia de quase 2 quilômetros na Califórnia nos Estados Unidos, próximo ao porto de Los Angeles e Long Beach. O teste do sistema foi realizado com três caminhões híbridos e pode ser porta de entrada para o desenvolvimento desse sistema nos Estados Unidos, aumentando a escalabilidade da tecnologia no país (SIEMENS MOBILITY, 2017).

Sendo o primeiro sistema eHighway testado no mundo em uma via pública, em 2016 a Siemens inaugurou na Suécia um trecho construído com o sistema com 2 quilômetros de extensão. A estrada está localizada na rodovia E16 ao norte de Estocolmo. O projeto de demonstração liga as regiões de Dalarna e Gävleborg, locais industriais dominados por siderurgia, papel e indústrias de mineração. Dois veículos foram utilizados na fase de testes, sendo caminhões híbridos fabricados pela Scania e adaptados, em colaboração com a Siemens, para operar sob o sistema de catenária (SIEMENS MOBILITY, 2015).

Na Figura 29, é possível verificar o modelo implantado na Suécia que, conforme mostram as duas fotos, não há separação entre as vias eletrificadas e as pistas destinadas aos veículos convencionais.



Figura 29 - Projeto eHighway na Suécia



Fonte: ZHAO *et al.* (2018)

### 3.3.3 Custo

Um aspecto muito importante para considerar quando se trata da construção e instalação das infraestruturas dos sistemas de eletrificação da Siemens são os custos reais atrelados ao projeto que se deseja implementar. No que tange um sistema *eHighway*, conforme exposto em seções anteriores, os principais custos para implementação estão atrelados aos custos das subestações de tração e a construção da infraestrutura para o sistema de catenárias.

Segundo ZHAO *et al.* (2018), o preço de compra de uma subestação de tração de 10/0,660 kV AC/DC que foi usada para a instalação de um sistema de bonde em Aalborg na Dinamarca foi estimado em aproximadamente US\$ 700.000, sendo que cada unidade é capaz de fornecer aproximadamente 900 kW. Destaca-se que, com base em estimativas aproximadas da Siemens, para um sistema *eHighway*, é necessária uma potência instalada mínima que varia em uma faixa entre 1 MW e 3 MW.

Em relação às catenárias aéreas, um estudo da SYSTRA/COWI estimou que os custos do sistema variam entre 800 k€ e 1 M€ por quilômetro, dependendo de sua construção (fio de cobre simples ou duplo) e localização do poste (axial ou lateral). Destaca-se que um estudo realizado em 2012 estimou que o sistema elétrico da catenária custava na faixa de 2-3 milhões de euros por quilômetro de rodovia, considerando as duas faixas de rodovias, evidenciando que os valores não tiveram variação significativa com o passar dos anos (ZHAO *et al.* 2018).

Segundo a Siemens Mobility (2017), o sistema *eHighway*, com extensão de 2 quilômetros, implementado na Califórnia custou cerca de US\$ 13,5 milhões e foi financiado com US\$ 2,5 milhões da SCAQMD, além de US\$ 4 milhões vindos de um acordo com a China Shipping, US\$ 3 milhões da California *Energy Commission*, US\$ 2 milhões do Porto de *Long Beach* e US\$ 2 milhões do metrô de Los Angeles. Além disso, a Siemens também forneceu uma contribuição em espécie de US\$ 1,3 milhão e a SCAQMD também forneceu US\$ 2,1 milhões adicionais.



### 3.3.4 Desafios

Para BATEMAN *et al.* (2018), ainda há determinadas barreiras técnicas que necessitam ser superadas para que o sistema de catenárias possa ser estabelecido em maior escala. Os principais deles seriam os custos e a limitação da aplicação do sistema *eHighway* a estradas abertas livres de túneis ou pontes. Além disso, destaca-se também que rodovias que recebem o sistema deixam de possuir acostamentos ou faixas para paradas de emergência.

Outro fator limitante à grande expansão da tecnologia é em relação às demandas de energia das cargas rodoviárias, uma vez que esse fator depende do fluxo do tráfego, podendo ter bastante oscilação. Dessa forma, o sistema precisa atender a condições extremas de tráfego, podendo exigir ainda uma maior quantidade de subestações de tração, aumentando os gastos de capital para implementar a tecnologia (ZHAO *et al.* 2018).

Segundo Siemens AG. ENUBA (2012), ainda são identificados os seguintes desafios com características mais técnicas em relação à tecnologia:

- Manutenção da força de contato entre o pantógrafo e a catenária, uma vez que a aplicação de uma pressão constante ajuda em garantir uma maior eficiência na transferência de energia. Destaca-se que essa força pode variar de acordo com o movimento do veículo na estrada, vento, irregularidades na pavimentação das rodovias, entre outros fatores;
- Desgastes no pantógrafo e, principalmente, nos cabos de catenárias devido ao atrito causado pelo contato constante entre os materiais. Nesse sentido, a degradação do material também pode influenciar na eficiência da troca de energia.

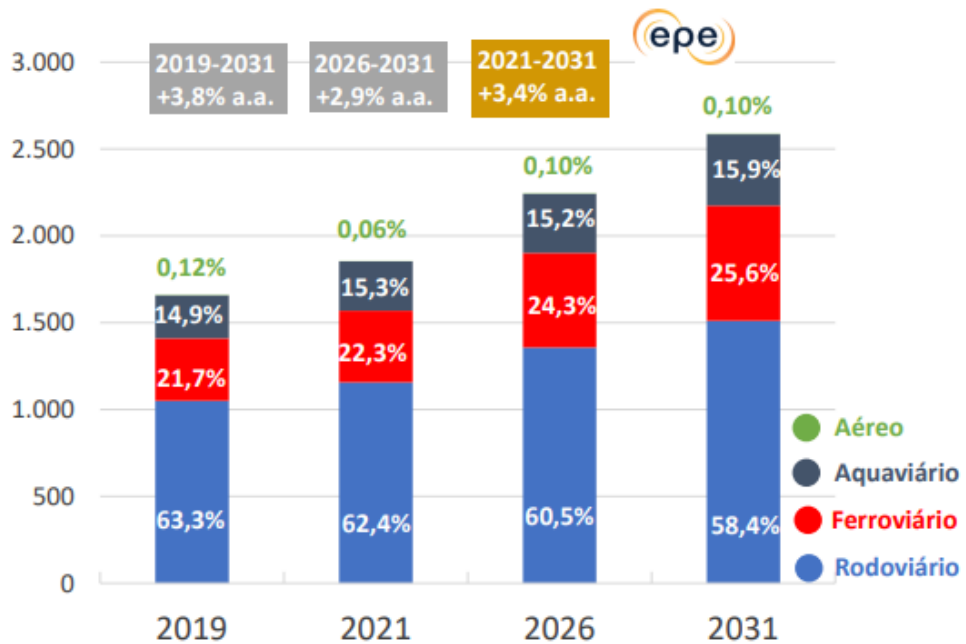
### 3.4 Verificação da carga adicional no sistema elétrico

A eletrificação do setor de transporte rodoviário de cargas implica, necessariamente, em um aumento de demanda de energia elétrica que deverá ser absorvida pelo sistema elétrico. Durante a revisão realizada, não foram identificados artigos e/ou estudos que avaliassem e/ou medissem o aumento da carga que a eletrificação desse setor pudesse acarretar de demanda adicional para o sistema elétrico. Dessa forma, para obter uma previsão desse valor, foi verificado a necessidade energética do setor.

No Brasil, segundo levantamentos realizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) e pela Empresa de Planejamento e Logística (EPL, 2020), o setor de transportes

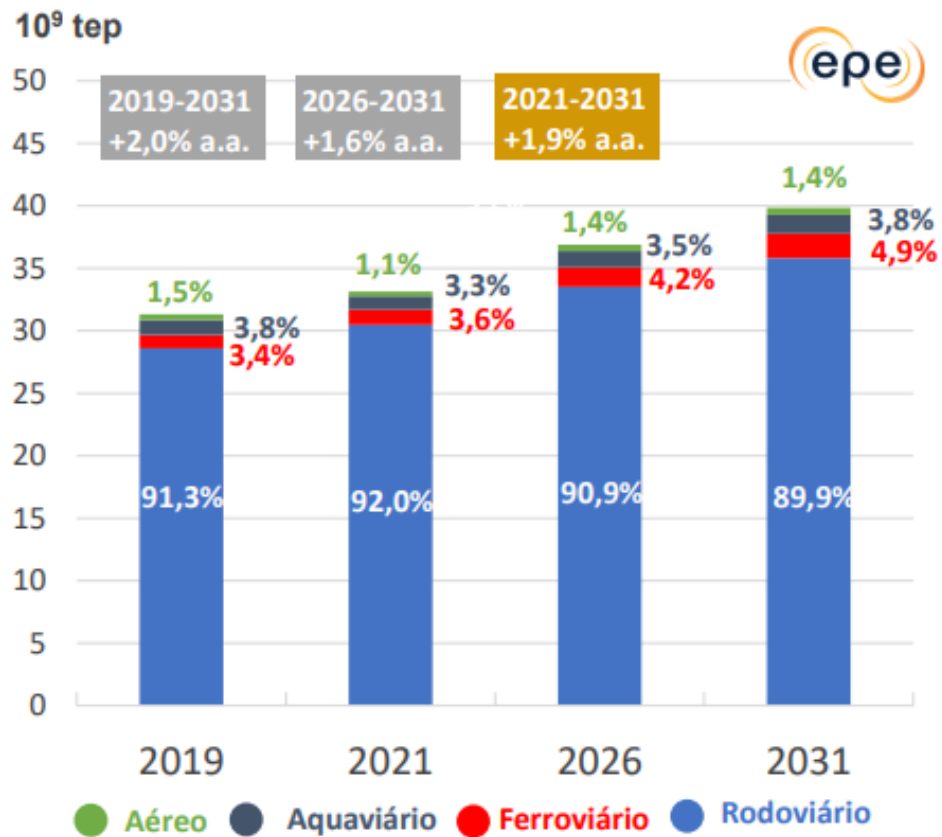
rodoviário de cargas é responsável por 55% da demanda de combustíveis derivados de petróleo e de gás natural. Além disso, o setor também foi responsável, em 2021, por 62,4% das atividades totais do transporte de cargas pelo país e, conforme indica o gráfico da Figura 30, há a expectativa deste setor ser ainda responsável por 58% dessas atividades no ano de 2031.

Figura 30 – Representatividade do transporte de cargas no Brasil por setor



A EPE (2021), ainda estimou que a demanda energética total do transporte de cargas em 2021 foi por volta de  $33 \times 10^9$  Toneladas Equivalentes de Petróleo (tep), sendo o transporte rodoviário responsável por 92% dessa demanda. Esse número cresce para  $40 \times 10^9$  tep em 2031, sendo de 89,9% a representatividade do transporte rodoviário, conforme indica o gráfico da Figura 31.

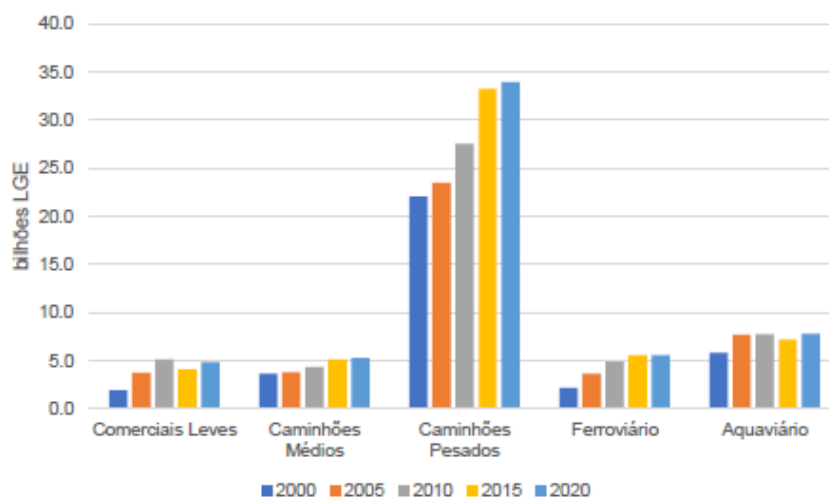
Figura 31 - Demanda Energética Total do Transporte de Cargas



No Brasil, a categoria dos caminhões pesados possui um papel significativo na demanda de energia solicitada pelo transporte rodoviário, uma vez que essa classe foi a principal agente no aumento do consumo de energia do setor de transportes ao longo do tempo, sendo a responsável direta por um incremento percentual de 219% no consumo energético do setor entre os anos de 2000 e 2020 (EPE e IEA, 2021).

Conforme indicado no gráfico da Figura 32, somente em 2020, os caminhões pesados possuíram um consumo energético quase 3 vezes maior do que os transportes ferroviário e aquaviário juntos. Se comparado ao consumo energético de caminhões de médio porte, os caminhões pesados indicam uma demanda por combustível quase 6 vezes maior.

Figura 32 - Consumo energético no transporte de carga, por modo, no Brasil



Fonte: IEA, 2021a

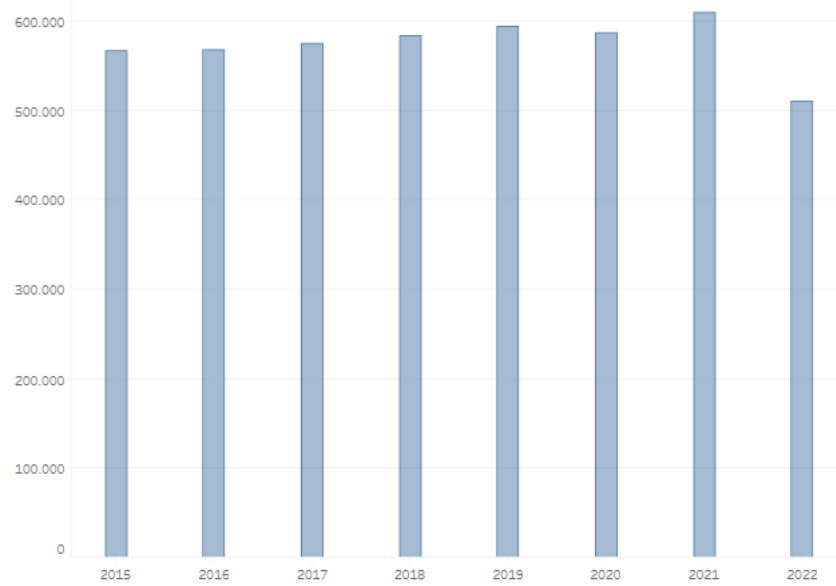
Nesse contexto, realizando uma estimativa de valores de demanda de energia para o quadro de caminhões pesados e considerando que seu consumo energético para o ano de 2020 foi de, aproximadamente,  $34 \times 10^9$  Litros de Gasolina Equivalente (LGE), pode-se estimar que o consumo de energia elétrica da frota de caminhões pesados brasileira 100% eletrificada seria em torno de 302,26 TWh, uma vez que 1 LGE corresponde a cerca de 8,89 kWh (VASCONCELOS, 2017).

Já o consumo de energia elétrica para uma frota 100% eletrificada de veículos comerciais leves e caminhões de médio porte, considerando o consumo energético de 2020 de aproximadamente  $10 \times 10^9$  LGE, gira em torno de 88,9 TWh.

Segundo o ONS (2022), o consumo energético do Brasil no ano de 2021 foi de aproximadamente 600 TWh, conforme indica a Figura 33. Dessa forma, os valores indicam que a eletrificação de 100% da rota rodoviária de caminhões pesados, médios e veículos comerciais leves representa um percentual de 65,2% do consumo energético atual de todo o país, indicando que o Brasil necessita ampliar sua capacidade instalada de geração de energia para que o sistema possa suprir essa demanda adicional.

Vale destacar ainda que existem ressalvas em relação ao valor final calculado e que esse consumo, por sua vez, pode ser melhorado e reduzido, tendo em vista que motores elétricos possuem um ganho de 40% de eficiência em comparação com motores a combustão. O consumo de energia elétrica das três categorias então poderá ser efetivamente estimado em um valor que gira em torno de 234,70 TWh, representando cerca de 40% do consumo brasileiro.

Figura 33 - Consumo de energia total do Brasil (GWh)

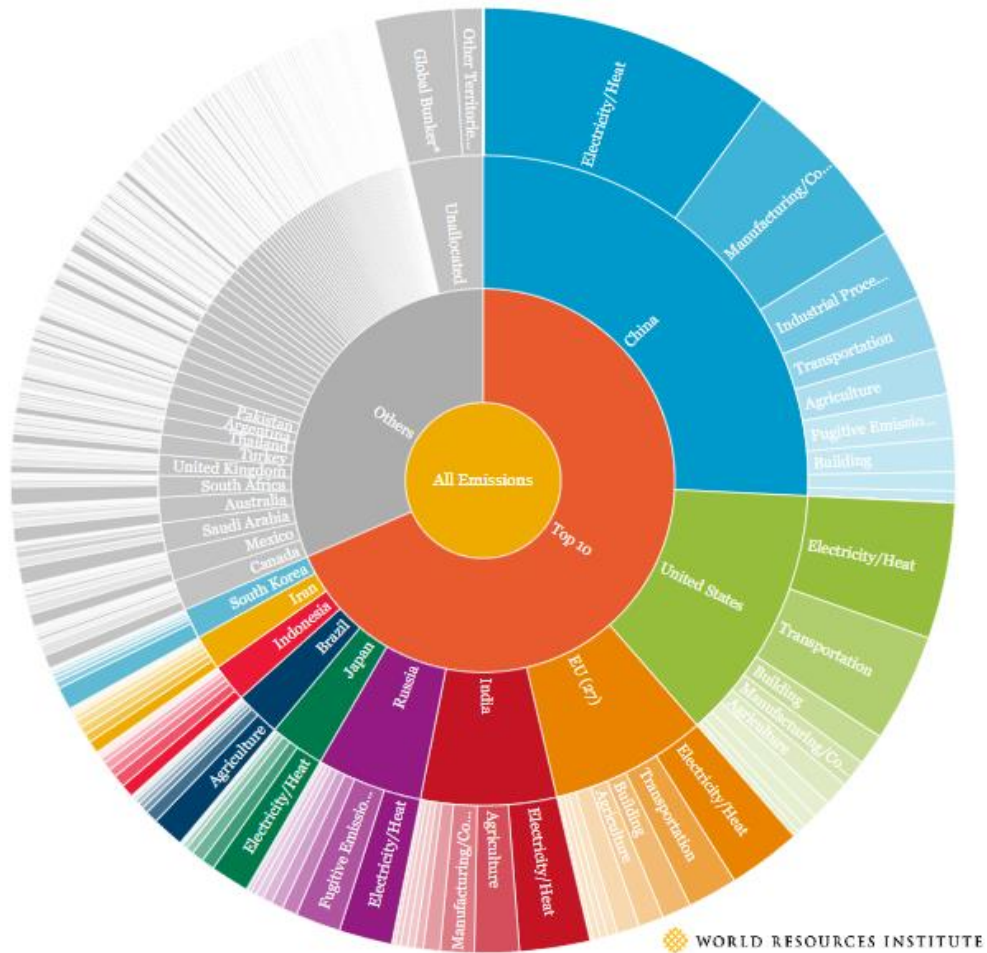


Fonte: ONS, 2022

### 3.5 Impactos nas reduções das emissões de GEE

Segundo *World Resources Institute* (2020), o Brasil ocupa o sétimo lugar no *ranking* de países que mais emitiram GEE em 2016, sendo responsável por 2,28% das emissões mundiais de GEE, ficando atrás de países como China, que foi responsável por 25,76% das emissões; Estados Unidos, responsável por 12,8%; União Europeia, responsável por 7,8%; Índia, por 6,74%; Rússia, por 5,26%; e Japão, responsável por 2,73%, conforme pode ser visualizado no gráfico da Figura 34.

Figura 34 - Top 10 países emissores de GEE



Fonte: *World Resources Institute*, 2020

Das emissões de GEE brasileiras, que chegam a 1050,3 Mt (megatonelada) de GEE, o setor de transporte é responsável por, aproximadamente, 19% dessas emissões, ou seja, o setor de transporte é responsável pela emissão anual de cerca de 198,5 Mt de GEE (WORLD RESOURCES INSTITUTE, 2020).

De acordo com a Figura 31, considerando que o transporte rodoviário é responsável por 91,3% de toda demanda energética do setor no Brasil, pode-se estimar que essa modalidade é também responsável por cerca de 90% dessas emissões, ou seja, o setor de transporte rodoviário deve emitir em média cerca de 175 Mt de GEE anualmente. Nesse sentido, considerando a eletrificação integral deste setor, seria coerente afirmar que o mesmo valor de emissões de GEE seria reduzido da atmosfera, representando uma redução de emissões nacional de cerca de 16,7%.

## 4 CONCLUSÃO

Diante do exposto, é possível concluir que estão sendo desenvolvidas tecnologias direcionadas para a eletrificação do setor de transporte rodoviário de cargas, objetivando a redução da emissão GEE nesse setor que é responsável por cerca de 23% das emissões de GEE no mundo.

As tecnologias de carregamento condutivo *plug-in*, carregamento indutivo e carregamento condutivo por catenária aérea já possuem exemplos de aplicação em pequena escala no mundo inteiro, conforme demonstrado nos capítulos deste trabalho.

Ainda existem desafios técnicos e de infraestruturas significativos associados, principalmente, ao carregamento indutivo e ao condutivo por catenária aérea, embora o sistema *eHighway* da Siemens seja o mais consolidado no mercado e já tenha sido testado em uma maior variabilidade de aplicações e de forma mais direcionada ao setor de transporte de longas distâncias;

O carregamento condutivo *plug-in* tem se mostrado uma alternativa interessante para o transporte urbano de cargas devido, principalmente, a sua autonomia, tendo em vista a logística de viagens com rotas mais curtas desse modelo de distribuição de mercadorias;

O custo da implantação da infraestrutura de um sistema de catenária tem uma média de US\$ 900.000 por quilômetro de rodovia, enquanto uma infraestrutura do carregamento indutivo custa, em média, US\$ 4.938.000 por quilômetro de rodovia. Sendo o custo de um sistema indutivo, em média, cinco vezes superior ao sistema de catenária desenvolvida pela Siemens. Por outro lado, destaca-se que a infraestrutura do carregamento condutivo dinâmico pode ser expandida para uma maior diversidade de veículos, ao contrário do sistema de catenárias.

Além disso, a revisão realizada indica que as tecnologias disponíveis no mercado possuem possibilidades de serem implementadas e aplicadas em maior escala pelo mundo. O custo associado a cada tecnologia ainda se mantém alto e existem melhorias técnicas que devem ser consideradas em todos os casos.

Adicionalmente, também é importante destacar que, em termos de redução da emissão de gases causadores do efeito estufa, considerando a eletrificação de 100% do setor de transporte de cargas, cerca de 16% das emissões de GEE do Brasil seriam reduzidas e impactariam de forma significativa o meio ambiente e as metas de sustentabilidade estabelecidas.

Por fim, o trabalho também indica ainda um contraponto para implantação de veículos de carga elétricos no Brasil, uma vez que, conforme mostrado, a demanda energética desse

setor, se 100% eletrificado, corresponderia a uma porcentagem de 65,2% do consumo brasileiro total atual, mas se considerado o fator de eficiência essa representatividade passa a ser de 40% do consumo atual, indicando que a capacidade instalada de geração de energia brasileira deve ser ampliada na mesma proporção para atendimento da nova demanda.

#### **4.1 TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se a seguinte lista

- Revisão sobre as topologias dos acopladores magnéticos utilizados nos sistemas RIPT estacionário e dinâmico, uma vez que os acopladores são os principais responsáveis pela eficiência da troca de energia;
- Realização de estudo a nível regional para melhor estimativa de custos do sistema para o estado do Ceará, obtendo dados sobre logística do transporte rodoviário local;
- Projetos de simulação para demonstração das tecnologias, objetivando precisão nas estimativas das demandas de energia, de custos e na análise de viabilidade do sistema proposto;
- Estudo de impacto no sistema elétrico brasileiro com a eletrificação gradativa do sistema de transporte rodoviário.



## REFERÊNCIAS

- MULHOLLAND, Eamonn; TETER, Jacob; CAZZOLA, Pierpaolo; MCDONALD, Zane; GALLACHÓIR, Brian P. Ó. The long haul towards decarbonising road freight: A global assessment to 2050. **Applied Energy**, [s. l.], p. 678-693, 22 jan. 2018.
- FIGUEIREDO, Beatriz Beca; CESAR, Francisco Ignácio Giocondo. HIDROGÊNIO COMO FONTE ALTERNATIVA DE COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVO: UMA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA EXPLORATÓRIA. **REVISTA CIENTÍFICA ACERTTE**, [s. l.], v. 1, ed. 6, 20 dez. 2021.
- ZHAO, Hengbing; WANG, Qian; FULTON, Lewis; JALLER, Miguel; BURKE, Andrew. A Comparison of Zero-Emission Highway Trucking Technologies. **EScholarship**, [s. l.], 18 out. 2018.
- MORENO, Nayibe Guerrero; MOLINA, Myriam Cisneros; GERVASIO, Dominic; ROBLES, Juan Francisco Pérez. Approaches to polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) and their cost. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], p. 897-906, 29 jul. 2015.
- CAMACHO, José Roberto; COSTA, Rodolfo. CÉLULA COMBUSTÍVEL DE MEMBRANA POLIMÉRICA EM REGIME ESTÁTICO E DINÂMICO DE CARGA. **ResearchGate**, [s. l.], 2008.
- MINH, Nguyen Q. Solid oxide fuel cell technology: features and applications. **SCIENCE DIRECT**, [s. l.], p. 271-277, 20 abr. 2004.
- AMADO, Roberto Salgado; MALTA, Luiz Fernando Brum; GARRIDO, Francisco M. S.; MEDEIROS, Marta Eloisa. PILHAS A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO: MATERIAIS, COMPONENTES E CONFIGURAÇÕES. **Quim. Nova**, [s. l.], v. 30, ed. 1, p. 189-197, 30 ago. 2006
- WANG, K.; HISSEL, D.; PÉRA, M. C.; STEINER, C.; MARRA, D.; SORRENTINO, M.; PIANESE, C.; MONTEVERDE, M.; CARDONE, P.; SAARINEN, J. A Review on solid oxide fuel cell models. **ScienceDirect**, [s. l.], p. 7212-7228, 13 abr. 2011
- ROBALINHO, Eric; SANTOS, Karolaine Aguiar dos. CÉLULA A COMBUSTÍVEL TIPO PEMFC: ENERGIA RENOVÁVEL E EFICIENTE. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, [s. l.], v. 13, ed. 3, 2021.
- WHISTON, Michael M.; AZEVEDO, Inês L; LITSTER, Shawn; SAMARAS, Constantine; WHITEFOOT, Kate S.; WHITACRE, Jay F. Meeting Solid Oxide Fuel Cell Cost and Degradation Rate Targets. **Joule**, [s. l.], p. 2060–2065, 8 ago. 2019.
- IEA. **Global Hydrogen Review 2021**, 2021.
- ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Biocombustíveis**, 2019.
- FGV – FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Biocombustíveis**, 2017.
- VIDAL, Maria de Fátima. PRODUÇÃO E USO DE BIOCMBUSTÍVEIS NO BRASIL. **Caderno Setorial ETENE**, [s. l.], 2019.

MAHMUDUL, H. M.; HAGOS, F. Y.; MAMAT, R.; ADAMA, A. A.; ISHAK, W. F. W.; ALENEZI, R. Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in diesel engines: A review. **ScienceDirect**, [s. l.], p. 497–509, 3 jan. 2017.

HASSAN, M. H.; KALAM, M. A. An overview of biofuel as a renewable energy source: development and challenges. **ScienceDirect**, [s. l.], p. 39 – 53, 2013.

HUSAM, Al-Mashhadani; SANDUN, Fernando. Properties, performance, and applications of biofuel blends: a review. **AIMS Energy**, [s. l.], 3 ago. 2017.

ELFASAKHANY, Ashraf. State of Art of Using Biofuels in Spark Ignition Engines. **Energies**, [s. l.], 2 fev. 2021.

SUAREZ, P aulo A. Z.; SANTOS, André L. F.; RODRIGUES, Juliana P.; ALVES, Melquizedeque B. Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los. **Quim. Nova**, [s. l.], v. 32, p. 768-775, 17 mar. 2009

ZHANG, Fujing; OBEID, Emil; NADER, Wissam Bou; LUO, Xiaobing; ZOUGHAIB, Assaad. Well-to-Wheel analysis of natural gas fuel for hybrid truck applications. **ScienceDirect**, [s. l.], 20 maio 2021.

CAMUZEUX, Jonathan R.; ALVAREZ, Ramón A.; BROOKS, Susanne A.; BROWNE, Joshua B.; STERNER, Thomas. Influence of Methane Emissions and Vehicle Efficiency on the Climate Implications of Heavy-Duty Natural Gas Trucks. **Environmental Science&Technology**, [s. l.], 19 maio 2015.

National Research Council. **Reducing the fuel consumption and greenhouse gas emissions of medium and heavy-duty vehicles, phase two**, 2014.

NICOLAIDES, Doros; CEBON, David; MILES, John. Prospects for Electrification of Road Freight. **IEEE**, [s. l.], 2018.

CRESWELL, John W. **Projeto de pesquisa métodos qualitativo, quantitativo e misto**. In: Projeto de pesquisa métodos qualitativo, quantitativo e misto. 2015.

MORAES, Jorge Françoso de. Vale a pena investir em tróibus? **Diario do transporte**, [S. l.], p. 3-5, 21 abr. 2019.

SIEMENS. *In: On the road with electric power: From the trolleybus to the eHighway*. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://new.siemens.com/global/en/company/about/history/stories/on-the-road-with-electric-power.html>. Acesso em: 28 ago. 2022.

SILVA, Thiago. Plamurb. *In: ESPECIAL – 70 anos do sistema tróibus em São Paulo: da inauguração até a privatização da operação*. [S. l.], 20 abr. 2019. Disponível em: <https://plamurblog.wordpress.com/2019/04/20/especial-70-anos-do-sistema-trolebus-em-sao-paulo-da-inauguracao-ate-a-privatizacao-da-operacao/>. Acesso em: 28 ago. 2022.

BRUNTON, Les. The trolleybus story. **IEE**, [s. l.], 1992

CHEN, Feng; TAYLOR, Nathaniel; KRINGOS, Nicole. Electrification of roads: Opportunities and challenges. **Applied Energy**, [s. l.], p. 109-119, 20 abr. 2015.

LAKHAL, H.; DHIEB, M.; GHARIANI, H.; LAHIANI, M. Wireless Power Transmission Technologies and Applications. **IEEE**, [s. l.], ed. 14, p. 168-173, 22 dez. 2013.

MRABET, B. Contribution to the study of microwave power transmission. Dissertação Ph.D. , **Dept. Elet. Eng., Harvard Univ.**, Cambridge, 2010.

FARINHOLT K.M.; PARK G.; FARRAR C.R., Energy Transmission for a Low Power Wireless Impedance Sensor Node. **IEEE**, vol. 9, no. 7, p. 793-800, 23 jul. 2009

REN Y.; CHANG K., 5.8-GHz Circularly Polarized Dual-Diode Rectenna and Rectenna Array for Microwave Power Transmission. **IEEE**, Vol. 54, No. 4, p.1495-1502, 7 abr. 2006.

MAHESH, Aganti; CHOKKALINGAM, Bharatiraja; MIHET-POPA, Lucian. Inductive Wireless Power Transfer Charging for Electric Vehicles: A Review. **IEEE**, [s. l.], v. 9, 13 out. 2021.

ETACHERI V., MAROM R., ELAZARI R., SALITRA G., e AURBACH D. Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: A review, **Energy Environ. Sci.**, vol. 4, no. 9, p. 3243-3262, 2011.

BARRY K. Electric Buses Test Wireless Charging in Germany. Acessado em 24 de agosto de 2022. Disponível em: <https://www.wired.com/2013/03/wireless-charging-bus-Germany>

TAIBER, Joachim G. Overview about Wireless Charging of Electrified Vehicles: basic principles and challenges. **IEEE**, [s. l.], 2014

DANESE, Alberto; GARAU, Michele; SUMPER, Andreas; TORSÆTER, Bendik Nybakk. Electrical Infrastructure Design Methodology of Dynamic and Static Charging for Heavy and Light Duty Electric Vehicles. **Energies**, [s. l.], v. 14, 8 jun. 2021.

QIU, Chun; CHUNHUA, Liu; CHAU, K. T; CHAN, Ching Chuen. Overview of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging. **EVS27**, [s. l.], 20 nov. 2013.

SHINOHARA, N., Beam control technologies with a high-efficiency phased array for microwave power transmission in Japan. Proc. **IEEE**, vol. 101, p. 1448-1463, 7 jun. 2013.

LIU C., Fundamental study on capacitively coupled contactless power transfer technology, **dissertação Ph.D.**, Dep. Elet. Comput. Eng., Univ. Auckland, Auckland, Nova Zelândia, 2011.

CHAU, K.T.; ZHANG D.; JIANG, J.Z.; LIU, C.; ZHANG Y. Design of a magnetic-g geared outer-rotor permanent-magnet brushless motor for electric vehicles. **IEEE Trans. Magn.**, vol. 43, no. 6, p. 2504-2506, 2007.

MAHMOUDITABAR, Farshid; VAHEDI, Abolfazl; TAKORABET, Nouredine. Design and Analysis of Interior Permanent Magnet Motor for Electric Vehicle Application Considering Irreversible Demagnetization. **IEEE**, [s. l.], v. 58, 2022.

KIM, C. G.; SEO, D.-H.; YOU, J.-S.; PARK, J.-H.; B. H. Cho. Design of a contactless battery charger for cellular phone. **IEEE Trans. Ind. Electron.**, vol. 48, no. 6, p. 1238-1247, 2001.

SUNGWOO L.; JIN, H.; CHANGBYUNG P.; NAM-SUP, C.;GYU-HYEOUNG, C.; CHUN-TAEK, R.; On-Line Electric Vehicle using inductive power transfer system. **IEEE**, p. 1598–1601, 2010.

SHIN J.; SHIN, S.; KIM, Y.; AHN, S.; LEE, S.; JUNG, G.; JEON, S.J.; CHO, D.H. Design and Implementation of Shaped Magnetic-Resonance-Based Wireless Power Transfer System for Roadway-Powered Moving Electric Vehicles, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2014.

MILLER, J.M.; JONES, P.T.; LI, J.M.; ONAR, O.C. Experience and Challenges Facing Dynamic Wireless Power Charging of EV's. **IEEE circuits and systems magazine**, 21 mai. 2015.

MI, Chris; MASRUR, M. Abul. Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives. **John Wiley & Sons**, [s. l.], ed. 2, 2018.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, M. de A. Fundamentos de metodologia científica. 7 edição. **Rio de Janeiro: Editora Atlas**, 2010.

CAMPI, T.; CRUCIANI, S; FELIZIANI, M. Magnetic shielding of wireless power transfer systems. **Proc. Int. Symp. Electromagn. Compat.**, p. 422-425, 2014.

MOHAMMAD, M.; PRIES, J.; ONAR, O.; GALIGEKERE, V. P.; SU, G. J.; ANWAR, S.; WILKINS, J.; KAVIMANDAN, U. D.; PATIL, D. Design of an EMF suppressing magnetic shield for a 100-kW DD-coil wireless charging system for electric vehicles. **Proc. IEEE Appl. Power Electron.**, pp. 1521-1527, 2019.

CAMPI, T.; CRUCIANI, S; MARADAI, F.; FELIZIANI, M. Active coil system for magnetic eld reduction in an automotive wireless power transfer system. **Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.**, p. 189-192, 2019.

ASA, E.; MOHAMMAD, M.; ONAR, O. C.; PRIES, J.; GALIGEKERE, V.; SU, G. J. Review of safety and exposure limits of electromagnetic elds (EMF) in wireless electric vehicle charging (WEVC) applications, **Proc. IEEE Transp. Electric.**, p. 17-24, 2020.

CIRIMELE, Vincenzo; DIANA, Michela; FRESCHI, Fabio. Inductive power transfer for automotive applications: state-of-the-art and future trends. **IEEE SM Engineering Systems Inc.**, [s. l.], 2018.

IMPROVING Air Quality for All. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://waveipt.com/warehouse-and-distribution/>. Acesso em: 9 out. 2022.

SUH, I. Application of shaped magnetic field in resonance (SMFIR) technology to future urban transportation. **CIRP design conference**, 2011.

AHN, S.; KIM, J. Magnetic field design for high efficient and low EMF wireless power transfer in on-line electric vehicle. **IEEE**, p. 3979-3982, 2011.

QUALCOMM Acquires HaloIPT Team and its Wireless Electric Vehicle Charging Technology. [S. l.], 7 nov. 2011. Disponível em:

<https://www.qualcomm.com/news/releases/2011/11/qualcomm-acquires-haloipt-team-and-its-wireless-electric-vehicle-charging>. Acesso em: 10 out. 2022.

ROLLS Royce to Industry Standard – EV Wireless Charging is Here. [S. l.], 26 jan. 2022. Disponível em: <https://moduscondito.com/wire-%2B-wonder/f/rolls-royce-to-industry-standard-%E2%80%93-ev-wireless-charging-is-here>. Acesso em: 10 out. 2022.

WIRELESS charging for electric vehicles. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.arup.com/projects/haloipt>. Acesso em: 10 out. 2022.

LAPORTE, Stéphane; COQUERY, Gérard; DENIAU, Virginie; BERNARDINIS, Alexandre de; HAUTIERE, Nicolas. Dynamic Wireless Power Transfer Charging Infrastructure for Future EVs: From Experimental Track to Real Circulated Roads Demonstrations. **World Electric Vehicle Journal**, [s. l.], v. 10, 24 nov. 2019.

BATEMAN, D; LEAL, D; REEVES, S; EMRE, M; STARK, L; OGNISSANTO, F; MYERS, R; LAMB, M. Electric road systems: a solution for the future?. **World Road Association**, [s. l.], 2018.

HIGHWAYS ENGLAND, Feasibility study: Powering electric vehicles on England’s major roads, 28 jul. 2015.

COBAN, Hasan Huseyin; REHMAN, Aysha; MOHAMED, Abdullah. Analyzing the Societal Cost of Electric Roads Compared to Batteries and Oil for All Forms of Road Transport. **Energies**, [s. l.], 6 mar. 2022.

GUSTAVSSON, Martin G. H.; HACKER, Florian; HELMS, Hinrich. Overview of ERS concepts and complementary technologies. **CollERS**, [s. l.], 2 abr. 2019.

FULLER, Micah. Wireless charging in California: Range, recharge, and vehicle electrification. **ScienceDirect**, [s. l.], 23 fev. 2016.

JAYALATH, Sampath; KHAN, Azeem. Design, Challenges, and Trends of Inductive Power Transfer Couplers for Electric Vehicles: A Review. **IEEE**, [s. l.], 24 dez. 2020.

VORA, Ashish P.; JIN, Xing; HOSHING, Vaidehi; SAHA, Tridib; SHAVER, Gregory; VARIGONDA, Subbarao; WASYNCZUK, Oleg; TYNER, Wallace E. Design-space exploration of series plug-in hybrid electric vehicles for medium-duty truck applications in a total cost-of-ownership framework. **Applied Energy**, [s. l.], p. 662–672, 9 maio 2017.

BORLAUG, Brennan; MURATORI, Matteo; GILLERAN, Madeline; WOODY, David; MUSTON, William; CANADA, Thomas; INGRAM, Andrew; GRESHAM, Hal; MCQUEEN, Charlie. Heavy-duty truck electrification and the impacts of depot charging on electricity distribution systems. **Nature energy**, [s. l.], v. 6, p. 673-682, 1 jun. 2021.

YANG, Lei; HAO, Caixia; CHAI, Yina. Life Cycle Assessment of Commercial Delivery Trucks: Diesel, Plug-In Electric, and Battery-Swap Electric. **Sustainability**, [s. l.], v. 10, 2 dez. 2018.

ANDRADE, Leonardo Helou Doca de. **AMBEV compra 150 caminhões elétricos da JAC Motors**. [S. l.], 8 out. 2021. Disponível em:

<https://www.transportabrasil.com.br/2021/10/ambev-compra-150-caminhoes-eletricos-da-jac-motors/>. Acesso em: 26 out. 2022.

JAC Motors Brasil. **JAC iEV1200T**, 2022. Disponível em: <https://www.jacmotors.com.br/veiculos/eletricos-detalhes/iev1200t#close>. Acesso em: 26 out. 2022.

PASSOS, Eduardo. **Novo elétrico nacional VW e-Delivery se paga em cinco anos e atrai o mundo**. [S. l.], 15 jul. 2021. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/novo-eletrico-nacional-vw-e-delivery-se-paga-em-cinco-anos-e-atrai-o-mundo/>. Acesso em: 26 out. 2022.

VILLELA, Marcos. **Danone entra para o clube das empresas que investem em caminhões elétricos**. [S. l.], 19 mar. 2022. Disponível em: <https://transportemundial.com.br/danone-entra-para-o-clube-das-empresas-que-investem-em-caminhoes-eletricos/>. Acesso em: 26 out. 2022.

MERCADO&CONSUMO (Brasil). **Seara amplia frota de caminhões 100% elétricos refrigerados**. [S. l.], 9 ago. 2022. Disponível em: <https://mercadoeconsumo.com.br/09/08/2022/economia/seara-amplia-frota-de-caminhoes-100-eletricos-refrigerados/>. Acesso em: 26 out. 2022.

GRUPO EMTTEL (Brasil). **Grupo Emtel investe em caminhões elétricos para aluguel de frotas**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://grupoemtel.com.br/grupo-emtel-investe-em-caminhoes-eletricos-para-aluguel-de-frotas/>. Acesso em: 26 out. 2022.

CRUZ, Delcy MAC. **Empresas ampliam investimentos em veículos elétricos**. [S. l.], 26 abr. 2021. Disponível em: <https://www.energiaquefalacomvoce.com.br/2021/04/26/empresas-ampliam-investimentos-em-veiculos-eletricos/>. Acesso em: 26 out. 2022.

VASCONCELOS, Yuri. Baterias de carros elétricos evoluem, mas ainda perdem em densidade energética para os combustíveis tradicionais. **Mais energia**, [s. l.], 2017. Disponível em: [https://revistapesquisa.fapesp.br/mais-energia/#:~:text=Enquanto%20as%20c%C3%A9lulas%20de%201%C3%ADtio,comum%2C%20cerca%20de%208.890%20Wh](https://revistapesquisa.fapesp.br/mais-energia/#:~:text=Enquanto%20as%20c%C3%A9lulas%20de%201%C3%ADtio,comum%2C%20cerca%20de%208.890%20Wh.). Acesso em: 6 dez. 2022.

AINALIS, D. T.; THORNE, C.; CEBON, D. Decarbonising the UK's Long-Haul Road Freight at Minimum Economic Cost. **Centre for Sustainable Road Freight**, [s. l.], 2020.

GERTENSBERG, F.; LEHMANN, M.; ZAUNER F. Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen. **Elektrische Bahnen**, 110, p. 452-460, 2012.

SACHSE, Thomas; GRÄBNER, Oliver; MÖCKEL, Meike; KASCHWICH, Claus; PLÄTTNER, Jens. Intelligent traffic control and optimization with cooperative systems on the eHighway. **International Conference on Connected Vehicles and Expo**, [s. l.], 2014.

PLOUGMANN, Alexander M.E.; KVIST, Kristan L.; VAERBAK, Magnus. Design of a Siemens eHighway System Implemented across Funen. **SDU**, [s. l.], 22 maio 2017.

Siemens AG. ENUBA: **Elektromobilität bei schweren Nutzfahrzeugen zur Umweltentlastung von Ballungsräumen**, 2012.

BIESENACK, H. U. A.: *Energieversorgung elektrischer Bahnen*. **B. G. Teubner Verlag**, Wiesbaden, 2006.

Siemens AG. Sitras TCI, **Wechselrichter für die DC-Bahnstromversorgung, Produktinformation**, 2008.

Siemens AG. Sitras SES/MES, **Energiespeicher in der DC-Bahnstromversorgung, Produktinformation**, 2008.

MOULI, K. Chandra; PANNIRSELVAM, N.; ANITHA, V.; PARDHU, D. V. V. Nagasai. A Study on E Highway: Future of Road Transportation. **International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)**, [S. l.], p. 143-145, 22 dez. 2018.

Siemens Mobility, 2021. **Terceiro teste de campo da eHighway começa na Alemanha**. Disponível em: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/test-field-ehighway-project-ewaybw>

Siemens Mobility, 2017. **Siemens builds eHighway in Germany**. Disponível em: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-builds-ehighway-germany>

Siemens Mobility, 2017. **Siemens demonstrates first eHighway system in the U.S.** Disponível em: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-demonstrates-first-ehighway-system-us>

Siemens Mobility, 2015. **Siemens builds first eHighway in Sweden**. Disponível em: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-builds-first-ehighway-sweden>

Road Traffic Technology, 2021. **Siemens Mobility consortium installs eHighway system in Germany**. Disponível em: <https://www.roadtraffic-technology.com/news/siemens-ehighway-germany/>

JÖHRENS, Julius; LEHMANN, Michael; BRAMME, Matthias; BRAUER, Clemens; BULENDA, Alexander; BURGHARD, Uta; BURGERT, Tobias; DOLL, Claus; KASSENS-NOOR, Eva; LINKE, Regina; ÖZTÜRK, Özgür; SCHÖPP, Ferdinand; STAUB, Markus; WERNER, Markus; WILKE, Jürgen; WORBS, Markus. Current technical findings on the eHighway system from field tests and accompanying research in Germany. **Ifeu**, [s. l.], 24 out. 2022.

MEYER, Tobias. Decarbonizing road freight transportation: A bibliometric and network analysis. **ScienceDirect**, [s. l.], 23 nov. 2020.

WORLD RESOURCES INSTITUTE (Brasil). **4 gráficos para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor**. [S. l.], 28 fev. 2020. Disponível em: [https://www.wribrasil.org.br/noticias/4-graficos-para-entender-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor?gclid=CjwKCAiAkfucBhBBEiwAFjbkr4d4YvYorMKZY0Ac5n60d5L5aXjMWwW0dponkLVFQinTxcDEiXFaxRoCEi0QAvD\\_BwE](https://www.wribrasil.org.br/noticias/4-graficos-para-entender-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor?gclid=CjwKCAiAkfucBhBBEiwAFjbkr4d4YvYorMKZY0Ac5n60d5L5aXjMWwW0dponkLVFQinTxcDEiXFaxRoCEi0QAvD_BwE). Acesso em: 18 dez. 2022.