



**AFFONSO CELSO ALDEIA C DA SILVA**

**Utilização de veículos elétricos no  
transporte rodoviário de cargas e os  
desafios para implementação no Brasil**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e  
Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Celso Romanel

Coorientador: Prof. Eric Serge Sanches



**AFFONSO CELSO ALDEIA C DA SILVA**

**Utilização de veículos elétricos no transporte rodoviário de cargas e os desafios para implementação no Brasil**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

**Prof. Celso Romanel**

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – PUC-Rio

**Prof. Eric Serge Sanches**

Coorientador

EMJCR Engenharia Ltda

**Prof. Nelio Domingues Pizzolato**

PUC-Rio

**Prof. Giovane Quadrelli**

UCP/RJ

**Prof. Marcelo de Jesus Rodrigues da Nóbrega**

CEFET/RJ

Rio de Janeiro, 30 de abril de 2021

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Affonso Celso Aldeia Caizzo da Silva**

Graduou-se em Engenharia Elétrica na UFF (Universidade Federal Fluminense) em 2015. Atualmente trabalha na área de pesquisa com eficiência energética e tem como tema de interesse o planejamento urbano sustentável.

#### Ficha Catalográfica

Silva, Affonso Celso Aldeia Caizzo da

Utilização de veículos elétricos no transporte rodoviário de cargas e os desafios para implementação no Brasil / Affonso Celso Aldeia Caizzo da Silva ; orientador: Nélcio Domingues Pizzolato ; co-orientador: Eric Serge Sanches. – 2021.

132 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, 2021.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Engenharia Urbana e Ambiental - Teses. 3. Veículos elétricos. 4. Transporte de carga. 5. Políticas públicas. 6. Mobilidade sustentável. I. Pizzolato, Nélcio Domingues. II. Sanches, Eric Serge. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

## Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado uma oportunidade única de explorar minha inteligência e ter condições de direcioná-la para pesquisas na área de engenharia.

À Igreja do Sagrado Coração de Jesus da PUC – Rio onde, por diversas vezes, elevei minhas orações a Deus para que este momento se concretizasse.

Aos meus pais, Rita de Cassia Aldeia Caiazzo da Silva e Carlos Alberto dos Anjos da Silva, pelo apoio incondicional e por nunca duvidarem da minha capacidade. Pela dedicação, pelo amor, pelo carinho e pelo incentivo mesmo nas horas mais difíceis da minha trajetória de vida.

A todos os meus familiares, pela torcida e por nunca duvidarem de todo o meu potencial e empenho para me tornar a cada dia um profissional melhor.

Ao meu padrinho, Roberto Aldeia Caiazzo, pelo apoio na elaboração da apresentação final desta dissertação.

Aos meus amigos e amigas, por sempre torcerem por mim e me darem provas diárias de como é bom ser querido, respeitado e admirado por ser um amigo fiel e companheiro.

A todos os professores da PUC – Rio, em especial meu estimado orientador Nélio por todo o seu empenho e dedicação ao longo da elaboração dessa dissertação.

Ao professor Eric Serge Sanches, pelo seu apoio e sua amizade desde os tempos em que eu ainda era um calouro do ciclo básico do meu curso de graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal Fluminense.

Às minhas amigas Maria Clarisse e Maria Beatriz, um agradecimento especial pelo carinho e pelo apoio que recebi em tantas disciplinas que fizemos juntos ao longo do curso de Mestrado.

Ao meu amigo Leandro Barros, engenheiro civil graduado pela UFF, pelo apoio fundamental nos conteúdos da área de transportes durante a elaboração desta dissertação.

A todos os funcionários do programa de Pós – Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da PUC – Rio.

À CAPES, pois o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## Resumo

Caiazzo, Affonso Celso Aldeia da Silva; Pizzolato, Nélío Domingues (Orientador); Sanches, Eric Serge (Co-orientador). **Utilização de veículos elétricos no transporte rodoviário de cargas e os desafios para implementação no Brasil**. Rio de Janeiro, 2021. 132p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Utilização de veículos elétricos no transporte rodoviário de cargas e os desafios para implementação no Brasil discute as principais políticas públicas internacionais bem sucedidas voltadas para a expansão da frota de veículos elétricos para o transporte rodoviário de carga e como tais políticas poderiam ser adaptadas ao modelo de negócio brasileiro. Análises sobre as principais políticas públicas em mercados estrangeiros que resultaram em incentivos fiscais, expansão da infraestrutura existente e fomento de novos negócios na transição da frota de veículos convencionais para veículos elétricos, além de estudo sobre as possíveis adaptações que a legislação brasileira permite para que essas políticas possam ser adaptadas ao mercado nacional são os principais desafios para o setor. Os administradores públicos possuem o desafio de promover a sustentabilidade, capaz de proporcionar qualidade de vida à população e garantir que os sistemas de distribuição de bens urbanos atendam com eficiência as necessidades das cidades. Entretanto, embora a eletrificação, forma internacionalmente vista como alternativa à produção de gás carbônico, e outros chamados gases de efeito estufa, desde que a produção de eletricidade seja vista como essencialmente “limpa”, surja como a principal alternativa para melhorar a eficiência energética, muitos países ainda não implementaram políticas públicas para dinamizar a transição de suas respectivas frotas. Os resultados da pesquisa podem contribuir com futuros estudos sobre adequação de políticas públicas bem sucedidas e possíveis adaptações ao modelo de negócio brasileiro no setor do transporte rodoviário de carga com enfoque na mobilidade urbana sustentável.

## Palavras-chave

Veículos elétricos; transporte de carga; políticas públicas; mobilidade sustentável.

## Extended Abstract

Caiazzo, Affonso Celso Aldeia da Silva; Pizzolato, Nélío Domingues (Advisor); Sanches, Eric Serge (Co-advisor). **Use of electric vehicules in road freight transport and the challenges for implementation in Brazil**. Rio de Janeiro, 2021. 132p. Master's Thesis – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This research discusses the main successful international public policies aimed at expanding the fleet of electric vehicles for road freight transport and how these policies could be adapted to the Brazilian business model. Analysis of the main public policies in foreign markets that resulted in tax incentives, expansion of the existing infrastructure and promotion of new businesses in the transition from the fleet of conventional vehicles to electric vehicles, in addition to a study on the possible adaptations that the Brazilian legislation allows for these policies can be adapted to the national market are the main challenges for the sector. Society is increasingly demanding in terms of sustainability and, in addition, public administrators have the challenge of promoting sustainable mobility, capable of providing quality of life to the population and ensuring that the systems of distribution of urban goods efficiently meet the needs of the population in the cities. However, although electrification appears as the main alternative to improve energy efficiency and reduce the emission of atmospheric pollutants and greenhouse gases, many countries have not yet implemented public policies to streamline the transition of their respective fleets. The results of the research may contribute to future studies on the adequacy of successful public policies and possible adaptations to the Brazilian business model in the road freight transport sector with a focus on sustainable urban mobility.

## Introduction

Vaz et al. (2015) report that, with regard to road cargo transportation, with urbanization increasingly augmenting, their respective demand values naturally tend to undergo a consequent expansion, resulting in concerns regarding the energy sources used by vehicles that, in turn, over the years, they have contributed to the pollution of the environment and to the worsening of the greenhouse effect.

Talebian et al. (2018) state that electrification has emerged as the main alternative to improve energy efficiency and reduce the emission of air pollutants

and GHG, in addition to noise pollution. Within this scenario, Talebian et al. (2018) also point out that the study of the electrification of urban freight was, in turn, in the background in a comparative analysis with the electric vehicles destined for the transport of passengers and, mainly in comparison with the private vehicles that, in turn, already have a relatively significant impact on urban transport planning and public policy formulation.

In this context, electric vehicles appear as an alternative to sustainable urban freight, especially for transporting goods in cities, but despite their numerous benefits, they still face several barriers that prevent their respective expansion, such as economic, technological, social barriers, cultural and infrastructure. Vaz et al. (2015) affirm that, currently, the average percentage in the markets where the transition from the fleet of vehicles powered by combustion to electric vehicles has been occurring successfully, is about 35% in the use of electric trucks for road transportation of cargo, especially in countries such as Sweden, Norway, Germany, Switzerland, France and the Netherlands.

Therefore, this topic is quite relevant in the area of sustainability of the transport sector, representing real opportunities for successful implementation in the Brazilian market model, through the importation of examples of successful international markets within the scope of public policies that were fundamental for that the transition from the fleet of vehicles powered by combustion to electric vehicles could begin in these markets. The most relevant aspects of this research should be based on the study of successful public policies so that such a transition could occur in other markets and how the Brazilian government, respecting national legislation, could import some of these successful policies into the country.

Figure 1 illustrates the main variables of the problem involved in the context of the scenario in question, showing the respective links between them and, in addition, how some secondary factors are capable of being connected with the main variables of the problem.

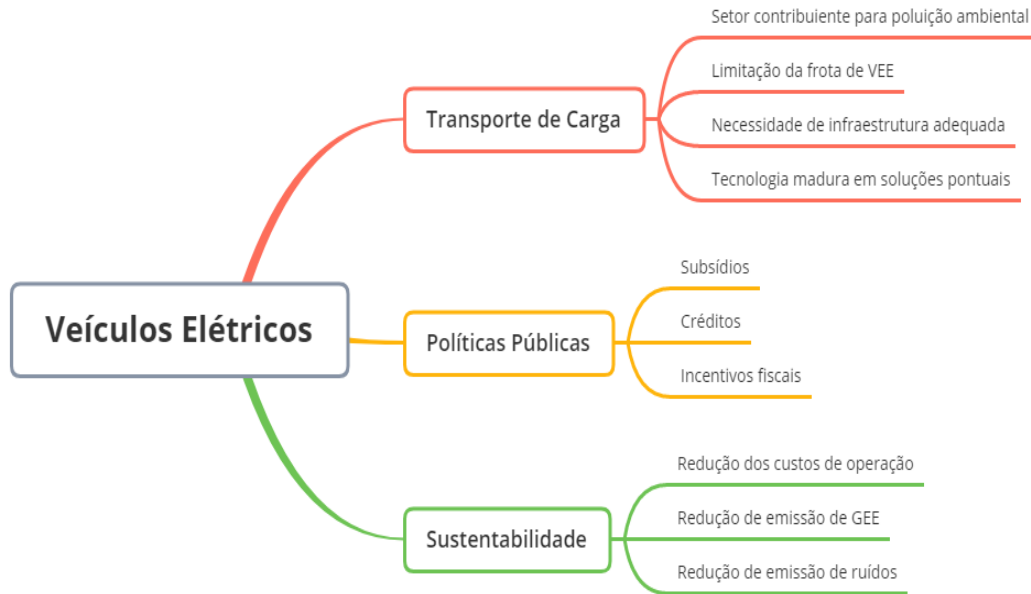


Figure 1 – Conceptual Maps

Source: The author

The variables of the problem are:

- Electric vehicles for the transport of goods in an urban environment (independent variable): Vehicles powered by electric motors, consisting of a primary energy system and one or more machines of an electrical nature with a drive and speed control system;
- Service for transporting goods by electric vehicles in an urban environment (dependent variable): This is the transport carried out by means of streets, roads and / or highways, aiming to move the loads to different places;
- Public policies (intervening variable): Set of government activities that act directly or through delegation, influencing the life of the population;
- Sustainability (dependent variable): Refers to the respective capacity to sustain or preserve a given process or system within the scope of the study



scenario in question.

The increase or reduction in the acquisition of new electric vehicles for the transportation of cargo in Brazil is the central variable of the problem and, by extension, it is a variable of an independent nature, not being directly influenced by possible changes in the guidelines of purchases of new vehicles for cargo transportation by companies that are interested in making the transition from their conventional vehicle fleet and, in addition, by new public incentive policies of the Brazilian government that do not go hand in hand with the expansion of the sale of new electric vehicles.

In the Brazilian case, there are factors of different origins that represent obstacles for this transition from the fleet of conventional vehicles to electric vehicles to be more effective. Among them, the economic factors, related to the initial investment and vehicle ownership costs for related companies. There are also social factors, related to occupational diseases, as in the case of workers in garbage collection companies and also risks of accidents due to the silent nature of electric vehicles that, in some cases, can prevent even pedestrians from hearing their approximation.

In addition, there are also environmental factors that are directly linked to the production and assembly line of electric vehicles, which is still responsible in Brazil for the large emission of GHG (Greenhouse Gases) gases, especially in the manufacture of batteries that, in addition, still have an inefficient market of recycling in the country, making it often necessary to have a new production line when it would still be possible to reuse some vehicles and their components.

However, the variable represented by cargo transportation is a dependent variable, since the increase in the fleet of electric vehicles for cargo transportation substantially affects the quality of the fleet of vehicles used in transportation by changing the behavior of the drivers and, in addition, contributes to improving sustainability (dependent variable) with services focused on preserving the environment and highly beneficial to Brazilian society from an economic, social and environmental point of view.

Within the context of cargo transport and public policies, which in turn represent an intervening variable in this problem, it is clear that this sector is responsible for major pollution in Brazil, second only to the industrial sector in terms of emissions of polluting gases into the atmosphere, as reported by Vaz et al.

(2015). In this way, it is understood that the transition of the type of fleet vehicles powered by the current combustion is important and necessary for a more sustainable future. However, the current fleet is quite limited, especially in terms of trucks and vans, while electric vehicles for private use are already at a more mature stage in terms of technology.

Therefore, there is a need to develop the recharging industry and infrastructure, which is directly related to tax incentives and investments by public policies so that companies are more interested in investing in the transition of their respective transport vehicle fleets of cargo. In addition, this technology is in very different stages of maturation in various sectors and, in some cases, represents specific solutions for consumers. Therefore, it is necessary for companies to envisage an infrastructure by the government that is able to motivate them to make a greater investment in these vehicles, but with the necessary conditions so that they can improve their activities and make them more sustainable on a daily basis.

## **Objectives**

The general objective of the present work is to analyze successful international public policies aimed at tax incentives, infrastructures and the promotion of businesses to support the transportation of loads by electric vehicles that can be adapted to the Brazilian business model to promote the expansion of the vehicle fleet for the transportation of cargo in Brazil.

In addition, the present work will also seek to detail the difficulties encountered in introducing electric trucks in the transportation of national cargo, since these were in the third plane, behind buses and electric cars. By extension, it is necessary to combine the profile of light vehicles and trucks used by the transported load capacity, whether semi-light, light, medium, semi-heavy or heavy, in the different types of operation, be it collection, distribution or transfer, in addition to the supply chain and physical distribution stages, thus understanding which segment vehicles are most suitable for, for example, food and beverages, electronics, furniture, stationery, among others.

The present work will also investigate international public policies regarding tax incentives (financing of vehicle purchases, reduction of taxes, etc.), infrastructures (charging stations) and promotion of private businesses to support the transport of loads by electric vehicles ( parts and battery recycling industries),

in addition to verifying possible adaptations of successful international policies to eventual adaptations in the national market after the importation of these policies by the Brazilian government with the support of the respective legislation of the country.

## **Methodology**

Articles, theses and dissertations that have links with the proposed theme will be searched, which will be initially selected from the title and summary of each one. After this selection, these will be read and those works that present a greater range of information about the proposed subject will be chosen, in a qualitative analysis.

The articles were searched together with the Web of Science, Science Direct and Scopus databases, which are carefully evaluated, guaranteeing the quality of those selected as the basis for the development of this work. At first, four keywords were chosen: electric vehicles, cargo transportation, public policies and sustainable mobility. As the keyword electric vehicles was the one that presented most results when the Boolean operator “or” was placed with all the keywords together and is the most important in the context of the development of this work, combinations with the Boolean operator “and” with all the others. Works were sought in the period from 2010 to 2020, due to presenting recent data on the proposed theme, without spatial delimitation.

In addition, documentary research on successful original public policies in other international markets will also be carried out, in order to explain in detail the relationships between these in terms of tax incentives, infrastructure measures and the promotion of new business with the expansion of the fleet of electric vehicles for road cargo transportation.

## **Proposals**

Electric vehicles, as they retain a technology in the development stage, present challenges that hinder their introduction in the sector of road cargo transportation.

However, as it is a technology that is still at the stage of maturation, electric vehicles present challenges related to their respective introduction in the cargo transport sector, such as, for example, the existence of an infrastructure necessary for its operation, the high acquisition costs, low autonomy, high recharge time, as

well as the second-hand market, which is still incipient for batteries and their other components. Such challenges may represent a still considerable obstacle for the population and companies not to choose to invest in electric vehicles, even with their countless benefits from an environmental and sustainability point of view.

This study proposed solutions capable of circumventing the previously mentioned problems to facilitate the introduction of electric vehicles in road freight transport. The Brazilian government, through investments and with the implementation of public policies aimed at tax incentives for the purchase of electric cargo vehicles, implantation of infrastructures for the transition of the fleet of cargo vehicles powered by combustion to electric vehicles and promotion of new businesses that support transport by means of electric vehicles, may contribute to the transition of the fleet to occur gradually, arousing greater interest in the population and responsible companies in the transport sector in investing in the acquisition of these vehicles. In addition, it is important to have the foundation of international public policies that have been successful in different international markets, so that, as long as they are duly adapted to Brazilian legislation, they can also generate satisfactory results in the application of electric vehicles.

Therefore, the proposed solutions to be implemented, aiming at the growth of electric vehicles in the urban cargo transport activity, are:

- Investments in research that lead to the production of less expensive batteries, since these are the most expensive element of electric vehicles;
- Use advanced routing systems that provide the maximum in terms of extracting the autonomy of electric vehicles;
- Implement different charging infrastructures such as, for example, fast recharging stations or changing batteries;
- Implement different charging infrastructures such as, for example, fast recharging stations or changing batteries;
- Install magnetic induction charging systems in the underground of the main highways;
- Invest in the training of drivers so that they can adapt to the technical and operational peculiarities of the vehicles and, thus, can drive them efficiently, especially in extreme temperatures;

- Invest in the development of the so-called circular economy, through remanufacturing and recycling processes.

## **Conclusions and suggestions for future work**

With regard to the respective introduction of electric vehicles in the road freight transport sector, it has been said that this introduction has already started in some markets, albeit slowly and gradually. Thus, it is essential to have knowledge of the respective cargo segments and logistics operations that are best suited to allow the transition from the traditional combustion-driven vehicle fleet to a new electric vehicle fleet.

In this scenario, concerns about the reduction of greenhouse gas emissions and their tragic consequences for the environment, in addition to air pollutants that cause serious damage to the health of the population, are the most important. However, there is still a concern regarding the sources of energy that gave rise to the electric energy, being fundamental, in this way, the use of renewable energy sources so that the generated electricity is a clean energy source since its production until its use.

From the results obtained through the methodology proposed for the present study, it is possible to verify the excellent potential that the electric vehicle has and, as a result, it is possible to emphasize the relevance of the theme and the respective justifications presented to encourage the process of transition of the traditional vehicle fleet to new fleets of electric vehicles in the road cargo transport sector.

In addition, the study in question also highlights the main international public policies aimed at tax incentives, infrastructures and the promotion of businesses to support road freight transport by electric vehicles and how these policies have shown positive results in the international markets where they have been implemented.

Based on the results obtained, it is recommended for future work studies aimed at Brazilian legislation and, consequently, proposals for methodologies capable of allowing the respective importation and subsequent adaptation of successful international public policies to the Brazilian business model, aiming at expand tax incentives and investments in infrastructure to collaborate with the gradual transition from the conventional vehicle fleet to the electric vehicle fleet

in the national road freight transport sector.

In addition, new research in the field of recycling batteries and other components that make up electric vehicles is also indicated, aiming to enable the improvement and even the creation of new methodologies in the still incipient second-hand market in the sector.

## **Keywords**

Electric vehicles; cargo transport; public policies; sustainable mobility.

## Sumário

1. INTRODUÇÃO	19
1.1 Contextualização	21
1.1.1 Fatores econômicos	23
1.1.2 Fatores sociais	24
1.1.3 Fatores ambientais	25
1.2 Problema de pesquisa	26
1.3 Objetivos	26
1.4 Justificativa	27
1.5 Relevância	28
1.6 Metodologia	28
1.7 Estrutura	32
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
2.1 Histórico dos veículos elétricos	34
2.1.1 Mundo	34
2.1.2 Brasil	37
2.2 O transporte de carga no Brasil	38
2.2.1 Frota	38
2.2.2 Fontes de energia utilizadas	39
2.2.3 Poluentes atmosféricos e GEE	42
2.3 Tipos de veículos elétricos	46
2.3.1 Híbridos (HEVs)	46
2.3.2 Veículos elétricos a bateria (BEVs)	48
2.3.3 A célula-combustível (FCEVs)	49
2.3.4 Alimentados diretamente pela rede elétrica	50
2.4 Baterias	51
2.4.1 Parâmetros das baterias	52
2.4.2 Tipos de bateria	53
2.5 Investimentos e projetos realizados pelo mundo	61
2.6 Análise dos modelos de VEs de carga no mercado	67
3. APLICAÇÃO DE VEs POR TIPO DE SERVIÇO	69
3.1 Entregas urbanas	69
3.2 Entregas a domicílio	71
3.3 Longa distância (Long-haul)	76
3.4 Serviços auxiliares	79
3.4.1 Coleta de lixo	79
3.4.2 Entrega de correspondências	82
4. PROPOSTAS	84
4.1 Viabilização da introdução de veículos elétricos no transporte de carga	84
4.2 Solução das barreiras aos veículos elétricos	93
4.2.1 Recarga dos veículos elétricos	94
4.2.2 Custos de aquisição	98
4.2.3 Desconhecimento dos usuários	99
4.2.4 Autonomia	101
4.2.5 Mercado de segunda mão	102
4.2.6 Temperaturas extremas	109
4.3 Políticas públicas de incentivo sugeridas	112
4.4 Soluções propostas no âmbito do cenário estudado	115
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	119





## Lista de Figuras

Figura 1 - Mapa Conceitual	29
Figura 2 - Plano de pesquisa	32
Figura 3 - Exemplo de caminhão <i>trolley</i>	51
Figura 4 - Piscinas utilizadas no processo de extração do lítio	57
Figura 5 - Triciclo utilizado no projeto " <i>La Petite Reine</i> "	67
Figura 6 - Demanda de energia para entregas domiciliares	72
Figura 7 - Técnica IPT para entregas de longa distância	78
Figura 8 - Demanda de energia diária para o sistema OnC	80
Figura 9 - Triciclos elétricos utilizados pelos Correios	83
Figura 10 - Exemplo de carregador de nível 1	96
Figura 11 - Dissipador de calor paralelo para baterias	111

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Frota brasileira com função de realização do transporte de cargas (Outubro/2020)	38
Tabela 2 - Estados brasileiros com maior capacidade instalada das energias eólica e solar (2019)	41
Tabela 3 - Maiores produtores mundiais dos materiais das LIBs	55
Tabela 4 - Investimentos financeiros e em infraestrutura pelo mundo	63

## 1. INTRODUÇÃO

Com a urbanização, a globalização, o crescimento populacional, a densidade habitacional, o desenvolvimento cada vez maior das grandes cidades ao redor do mundo e o “boom” vivido pelo comércio eletrônico nos últimos anos, deu-se, por consequência, a expansão da circulação de veículos e bens nas vias urbanas, e o transporte de cargas se tornou um suporte vital para atender às necessidades da população e promover o desenvolvimento social e econômico dos países, sendo um fator de grande importância no PIB (Produto Interno Bruto) das nações, e levou também a um grande aumento na demanda de energia.

Todavia, tal crescimento não foi acompanhado de um desenvolvimento sustentável e as emissões de poluentes atmosféricos e gases do efeito estufa (GEE) atingiram valores alarmantes, o que levou à preocupação global sobre suas consequências para o planeta, sendo as principais delas as mudanças climáticas e a maior ocorrência de eventos extremos, como furacões, tempestades e desertificações em decorrência do aquecimento global. Mirhedayatian e Yan (2018) afirmaram que para ocorrer a estabilização climática é necessária uma mudança para frotas predominantemente compostas por veículos elétricos até o período entre os anos de 2040 e 2050. Vaz *et al.* (2015) comentaram que um dos motivos que levou a esta situação é a predominância do modo rodoviário de frete, com 67% de todo o volume no Brasil, fato ainda agravado pelos constantes congestionamentos que provocam. Atualmente, 55% da população mundial vive em áreas urbanas e este número tende a crescer para 68% em 2050 (ONU, 2018 *apud* Ehrler *et al.*, 2019).

Devido a este contexto, a sociedade está se tornando cada vez mais exigente em termos de sustentabilidade, e os administradores públicos têm o difícil desafio de promover a mobilidade sustentável, proporcionando qualidade de vida à população, ao mesmo tempo em que asseguram que os sistemas de distribuição de bens urbanos atendam com eficiência às necessidades da cidade e que todos os resíduos decorrentes da utilização dos produtos sejam removidos e tenham um descarte adequado. Portanto, a busca dos administradores públicos é a promoção de soluções e políticas de distribuição de bens urbanos que sejam ecologicamente corretas e simultaneamente eficientes o suficiente para satisfazer a sociedade, garantindo a mobilidade dos cidadãos, mantendo o nível de serviço e sendo lucrativas para os diversos agentes envolvidos no negócio, tendo como principal objetivo o equilíbrio entre o crescimento

econômico e o desenvolvimento sustentável.

Tratados internacionais sobre mudanças climáticas, como, segundo Kawakami *et al.* (2018), os protocolos de Kyoto (1992) e mais recentemente o acordo de Paris (2015), estipularam um limite de toneladas de carbono que os países podem emitir na atmosfera. Dessa forma, cada um deles precisa definir um limite de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) pelos setores, como industrial e de transportes, sendo o segundo o único que vem aumentando seus níveis de emissões desde 1990 (Kawakami *et al.*, 2018). O acordo de Paris estabeleceu também que a temperatura global até o final do século só pode aumentar em no máximo 2° C. Sovacool *et al.* (2019) afirmaram que para haver uma chance de 66% do aumento da temperatura global ficar abaixo de 2° C, as emissões de carbono relacionadas à energia devem cair 70% em 2055 comparadas aos níveis de 2020, o que exigiria grandes esforços como triplicar a taxa anual de melhoria da eficiência energética.

O dióxido de carbono é responsável por quase 83% das emissões de GEE do transporte rodoviário no mundo (Zhao *et al.*, 2019). Avanços nesse objetivo já são claramente percebidos, como na tendência da substituição dos combustíveis fósseis pela eletricidade na área da mobilidade, que vem ocorrendo de forma lenta, porém contínua. Talebian *et al.* (2018) afirmaram que a eletrificação pode resultar numa redução das emissões de GEE e da contaminação do ar em larga escala se a energia for gerada a partir de fontes renováveis ou se as instalações de produção estiverem equipadas com tecnologias de captura de carbono, fato que deve ser considerado, já que Juan *et al.* (2016) mostraram que o setor de transportes representa mais de 25% do total do consumo mundial de energia, e Fiori e Marzano (2018) disseram que em 2014, apenas cerca de 27% do consumo total de fontes renováveis foram nos transportes. Huda *et al.* (2018) disseram que a Agência Internacional de Energia (IEA) demonstrou que a participação dos veículos elétricos em cerca de 40% do crescimento das vendas reduziria a concentração de GEE em aproximadamente 450 ppm.

A eletrificação vem surgindo como a principal alternativa para melhorar a eficiência energética e reduzir a emissão de poluentes atmosféricos e de GEE e a poluição sonora, tendo sido vendidos 2 milhões de veículos elétricos (VE) no mundo em 2016 (Kawakami *et al.*, 2018), valor em ascensão, mas ainda bem abaixo do ideal. Porém, uma pegada ecológica discreta no ambiente urbano é feita pelo transporte de mercadorias, já que os estudos e pesquisas sobre a eletrificação do frete urbano ficaram relegados a terceiro plano em comparação com os veículos elétricos destinados ao transporte público e principalmente com os

carros particulares, apresentando, em ambos, grande impacto no planejamento de transportes e formulação de políticas públicas. Ehrler *et al.* (2020) acrescentaram que muitos países ainda não implementaram políticas e medidas de apoio para substituir o frete urbano de veículos convencionais por elétricos, apenas algumas empresas individualmente estão implementando os VEs em suas frotas, e ainda enfrentam a dificuldade da oferta limitada de veículos, já que a maioria das opções de modelos de VEs atuais são carros pequenos ou veículos destinados a aplicações específicas, como tratores. Além disso, os efeitos negativos dos transportes dificilmente são levados em consideração no desenvolvimento das atuais políticas de planejamento das cidades e estratégias logísticas. Com isso, o objetivo deste trabalho será mostrar quais as barreiras ainda existentes para o crescimento dos veículos elétricos no transporte de cargas e propor soluções para resolver estes entraves.

### 1.1 Contextualização

Historicamente, os veículos rodoviários são movidos por um motor a combustão interna, que gera energia mecânica queimando na câmara de combustão um combustível líquido, mais frequentemente gasolina ou diesel, e geram gases do efeito estufa (GEE) e poluentes atmosféricos expelidos pelo escapamento, além de poluição sonora, que, no caso de operações específicas, como os coletores de lixo, por exemplo, pode levá-los à perda parcial ou total da audição com o decorrer do tempo, além do fato da maior parte deste serviço ser realizada no período noturno, horário em que há a exigência de silêncio. Com a busca cada vez maior por sustentabilidade, os veículos elétricos surgem como alternativa, com seu sistema, apresentando maior eficiência, que corresponde ao percentual de energia elétrica transformado em energia útil para o veículo, entre 59 a 62%, valor calculado pela multiplicação da eficiência da bateria e do carregador (90% cada), e do motor elétrico (entre 72,4% a 76,2%), esta última já ajustada para perdas no inversor, transmissão e sistemas auxiliares (Vaz *et al.*, 2015).

A eficiência do motor elétrico sem considerar essas perdas também é de cerca de 90%, e do motor a combustão interna, de 40% (Baran e Legey, 2011). O valor da eficiência de um veículo a combustão interna é aproximadamente 35% (Tanco *et al.*, 2019), e além do motor, também perdem energia na transmissão. Wang e Thoben (2017) completaram afirmando que, quando os motores a combustão interna convertem energia química em energia mecânica, eles perdem mais de 50% de energia para atrito, bombeamento de ar e calor desperdi-

çado. Yuksel e Michalek (2015) afirmaram ainda que os VEs possuem alta eficiência de recarga, de aproximadamente 87%, que representa a eficiência do carregador mais a do equipamento de recarga do VE, ou seja, a taxa de energia fornecida pela rede que pode ser carregada na bateria, sem considerar perdas que possam ocorrer entre o carregador e a bateria, valor esse que pode variar de acordo com o tipo e nível das estações de recarga. Esse valor não afeta a duração da recarga. Considerando essas possíveis perdas, a eficiência do carregador + bateria seria estimada em 81% (90% x 90%).

Além disso, não emitem poluição atmosférica pelo tubo de escape; emitem ruídos praticamente imperceptíveis, e por isso são adequados para entregas noturnas, aumentando sua flexibilidade operacional; possuem menores custos operacionais, que possuem um papel crucial nos transportes de carga, já que percorrem maiores quilometragem anuais, fato que pode ajudar na expansão dos veículos elétricos, de seguro e de manutenção, este último de 20 a 30% (Quak *et al.*, 2016a; Margaritis *et al.*, 2016; Ehrler *et al.*, 2019), quando não inclui a substituição de peças e especialmente da bateria, já que esta, o motor e a eletrônica apresentam poucos problemas, o que aumenta a confiabilidade nesses veículos e sua vida útil, além do motor possuir um número bastante inferior de peças móveis de rotação sujeitas a desgaste, o que facilita o processo; o motor e o sistema de transmissão, que possui apenas uma engrenagem, são mais leves; não necessitam da substituição de filtros e fluidos operacionais; não consomem energia quando parados no trânsito e sua aceleração é mais rápida devido à maior eficiência energética, ao deslocamento suave dos motores elétricos e a pneus mais resistentes; apresentam menores consumo e custo de energia por km percorrido devido a *powertrains* mais eficientes, sendo a energia elétrica necessária para recarregar as baterias cerca de 6 vezes mais barata que o combustível dos veículos a combustão interna (Kijewska *et al.*, 2019), e existe a tendência de se reduzir ainda mais nos próximos anos; seu sistema de direção elétrica exige menos potência do motor, o que reduz o consumo de energia dos veículos, aumentando assim, segundo Dias e Rodriguez (2018), a eficiência energética em cerca de 85%; é mais confortável, permite maior variação na assistência da condução conforme a velocidade, e requer menos manutenções (Dias e Rodriguez, 2018); e são mais fáceis e confortáveis de serem conduzidos devido a não possuírem sistema de embreagem, sendo assim veículos de marcha automática, apresentando valor de torque elevado e constante em qualquer faixa de rotação do motor.

### 1.1.1 Fatores econômicos

Fatores econômicos, sociais e ambientais são avaliados para a viabilização da introdução dos veículos elétricos no transporte de cargas brasileiro. O fator econômico mais importante são os denominados custos totais de propriedade (TCO), que Wang e Thoben (2017) definiram como uma ferramenta de compra e filosofia que visa entender o verdadeiro custo de comprar um determinado bem ou serviço de um determinado fornecedor. Tanco *et al.* (2019) comentaram que os TCO analisam todos os custos incorridos durante o ciclo de vida de um veículo, fornecendo uma ferramenta adicional para a tomada de decisão de possíveis compradores. Para os veículos elétricos, os TCO incluem os custos de investimento (preço de compra e infraestruturas), operacionais (custos de eletricidade, manutenção e reparação), custos de propriedade (custos de seguro, licença, registro, depreciação, encargos e impostos sobre veículos) e de segunda mão (descarte e reciclagem ou outro processo para baterias e veículos em fim de vida útil).

Os custos de investimento e de propriedade são os custos fixos dos veículos e os operacionais, os custos variáveis. Os proprietários de frotas são significativamente mais sensíveis ao TCO em relação ao mercado de veículos particulares e utilizam o período de retorno como critério para tomar uma decisão de compra, tendo como fator chave de competitividade a utilização dos veículos, na qual os custos operacionais devem ter uma economia significativamente alta para compensar os altos custos de aquisição. A alta utilização dos VEs destinados ao transporte de cargas pode tornar o período de retorno destes menor que de carros elétricos particulares (Hoekstra, 2019). As empresas devem obter uma taxa de retorno superior ao custo de capital investido, que corresponde ao total de recursos, próprios ou de terceiros, que financiam as necessidades a longo prazo das empresas, para obter assim um aumento no seu valor de mercado (Prates, 2016).

Em relação ao transporte, os custos totais de propriedade referem-se aos custos dos veículos, dos tempos de viagem, das instalações rodoviárias, dos estacionamento, dos congestionamentos, dos pagamentos de tráfego e ambientais. Os veículos apresentam como custos externos: possíveis acidentes; as instalações rodoviárias; o desgaste que sofrem devido à utilização e às intempéries; os custos ambientais; os ruídos; a poluição atmosférica; as emissões de GEE; a intrusão visual; as mudanças climáticas; perdas de biodiversidade. As externalidades que mais influenciam nos custos do transporte de carga são os acidentes, seguidos pelas mudanças climáticas, empatadas com os congestio-

namentos (Foltynski, 2014). Cada externalidade deve ser adequadamente precificada para a definição de pagamentos adequados nas políticas de transporte. São prejudiciais à economia dos países, como na região da União Europeia, onde representam cerca de 8,5% do PIB (Korzhenevych *et al.*, 2016 *apud* Juan *et al.*, 2016).

Kampker *et al.* (2018) definiram três etapas sequenciais para calcular o TCO. Na primeira, através da definição do ciclo de acionamento, se elétrico ou convencional, da quilometragem e da vida útil esperadas, é definido o tipo de força motriz a ser utilizado. Na segunda, através das condições de condução, dos parâmetros físicos do veículo e das empresas desenvolvedoras, cálculos são realizados, é configurado o *powertrain* do veículo, definindo seus parâmetros para um modelo elétrico que atenda o serviço utilizado, e previsto o consumo de energia necessário. Taefi *et al.* (2017) disseram que uma dificuldade ainda existente é que dados realistas sobre o consumo de energia de veículos elétricos de carga são escassos, por isso estes valores são baseados em dados de limite de velocidade impostos pelos fabricantes ou calculados aplicando horários, paradas para recarga, distâncias percorridas e ciclos de condução do mundo real, este segundo mais adequado. Para calcular o consumo de energia dos VEs em tempo real, uma solução é implantar um modelo semelhante ao *Spritmonitor*, que é utilizado para veículos a diesel. Neste, os motoristas se cadastram em um site e no sistema atualizam os abastecimentos realizados. Na terceira, são analisadas as taxas de juros, depreciação e os preços do combustível e eletricidade, e estes são testados nos mais diversos cenários, através de iterações e ajustes.

Feng e Figliozzi (2012) falaram que à medida que os veículos envelhecem, seus custos operacionais e de manutenção por quilômetro percorrido aumentam e sua autonomia e valor residual diminuem, aumentando o TCO. Esses valores variam de acordo com o modelo do veículo. Quando os custos de O&M atingem níveis altos, pode ser rentável substituir os veículos, já que a economia destes custos pode compensar o alto custo de capital na compra de novos veículos. O mesmo raciocínio vale para as substituições de baterias.

### 1.1.2 Fatores sociais

Como fator social, deve-se discorrer sobre os ruídos. Quando em grande quantidade, podem ocasionar problemas na saúde dos trabalhadores, principalmente aqueles mais sujeitos aos ruídos, como os coletores de lixo. Os veículos elétricos evitam essas doenças, porém para Wang e Thoben (2017) podem ocasionar problemas de segurança, já que os motores elétricos são tão silenciosos



que os pedestres e outros motoristas têm dificuldade em ouvi-los se aproximando, o que pode provocar acidentes e consequentes congestionamentos nas rodovias urbanas.

### 1.1.3 Fatores ambientais

Quanto aos fatores ambientais, três abordagens para as emissões de CO<sub>2</sub> são estudadas: WTT (*Well-to-tank*), que corresponde a etapa desde a produção da energia elétrica até o seu fornecimento para o usuário nas estações de recarga, TTW (*Tank-to-wheel*), correspondente ao intervalo em que os veículos são recarregados na rede elétrica até o seu consumo durante as jornadas e a WTW (*Well-to-Wheel*), que corresponde a soma das duas primeiras abordagens. A mais importante observação é que é menos eficaz os veículos movidos à eletricidade não emitirem dióxido de carbono durante suas jornadas se durante a produção o CO<sub>2</sub> for emitido, sendo fundamental a utilização de fontes renováveis na origem da eletricidade.

Luna *et al.* (2019) comentaram que é essencial que os consumidores saibam qual a origem da produção da energia elétrica, pois além da desconfiança ainda existente quanto à nova tecnologia dos VEs, ao alto custo de aquisição, entre outras barreiras ao crescimento dos veículos elétricos, não conhecer a fonte energética da qual se origina a eletricidade pode levá-los a pensar que estão apenas substituindo a fonte causadora da poluição atmosférica. Yuksel e Michalek (2015) alertaram sobre a importância de computar no ciclo de vida também a necessidade de haver redução de emissões durante o fornecimento das matérias-primas, que juntamente com a produção de eletricidade, constituem a etapa de rede de suprimentos.

Outro problema ambiental enfrentado é a falta de um mercado de segunda mão para as baterias e os veículos elétricos, com os processos de reciclagem e reutilização ainda em níveis muito abaixo do ideal no Brasil, especialmente o primeiro. No país, para a reciclagem das baterias de íon de lítio, que são as mais utilizadas, ainda não foi estabelecido um modelo de negócios viável devido às baixas taxas de coleta e tecnologia imatura. A concorrência entre os fabricantes de equipamentos originais (OEM) por recursos escassos demonstra a importância da reciclagem dos VEs e baterias em fim de vida útil. Um fator que pode facilitar a revenda dos caminhões elétricos, apesar de impactar negativamente para a transportadora, é o seu valor residual bastante inferior ao de compra, devido à alta depreciação que sofre com o decorrer dos anos, situação na qual uma manutenção adequada poderia diminuir o prejuízo, e sua revenda costuma ocorrer

mais rapidamente comparada aos veículos particulares.

A depreciação é o maior custo incorrido na propriedade e operação dos veículos, principalmente por volta dos primeiros cinco a seis anos de propriedade, período no qual o veículo perde a maior parte do seu valor. No último levantamento realizado, para o ano de 2018, a idade média para os veículos comerciais leves é de 7 anos e 11 meses, e para os caminhões, é de 11 anos e 4 meses no Brasil, e as previsões direcionam para um contínuo envelhecimento da frota nacional (Sindipecas, 2019), o que contribui para o aumento da emissão de ruídos e partículas em adição aos GEE.

## 1.2 Problema de pesquisa

Como a predominância rodoviária no setor do transporte de cargas não se modificará de forma rápida, uma forma de atenuar a poluição causada é a introdução de veículos elétricos no ramo, e apesar das inúmeras vantagens que apresenta, também possui barreiras ao seu desenvolvimento, sendo as principais a falta de informações da população e das empresas sobre este tipo de força motriz e seus benefícios ambientais, o que gera uma desconfiança de muitos e faz com que seu potencial não seja explorado ao máximo; os altos custos de aquisição, impulsionados principalmente pelos custos de pesquisa, desenvolvimento e das baterias; a baixa autonomia, que pode exigir recargas frequentes, inclusive entre clientes de uma mesma distribuição ou coleta, já que reduzir o número de entregas não é uma opção lucrativa, e aumento da capacidade da bateria, o que aumenta o seu preço e peso, que pode chegar a 450 kg; e o longo tempo de recarga.

Wang e Thoben (2017) concluíram então que o objetivo dos pesquisadores é desenvolver uma bateria leve, pequena e de alta capacidade, aumentando a proporção do alcance sobre o tamanho da bateria e reduzindo o peso e dimensões dos veículos, mas os custos totais ainda limitam os seus maiores desenvolvimento e emprego. Outro entrave é que a infraestrutura de recarga necessária aos veículos elétricos ainda está em estado bastante inicial, o que leva a descrença em sua efetividade e limita os usuários, que, por terem o risco de não ter onde recarregá-los a tempo, se sentem menos dispostos a adquiri-los. Deve-se encontrar soluções para resolver essas desvantagens e possibilitar a viabilização do uso dos veículos elétricos no transporte de carga.

## 1.3 Objetivos

O objetivo geral é, por meio de uma abordagem sistêmica envolvendo os diversos fatores do sistema dos veículos elétricos, como fontes de energia, tipos

dos VEs, baterias, porte dos veículos, operações do transporte de cargas, formas de recarga, entre outros, entender o seu potencial e, com isso, estabelecer condições que viabilizem o seu uso no transporte de carga, como por exemplo, incentivos financeiros, já testados em alguns países na forma de subsídios, créditos, incentivos fiscais e isenções de taxas e impostos; e na área da infraestrutura, com projetos de recarga e áreas destinadas a testes.

No caso brasileiro, o trabalho visa sugerir políticas públicas de promoção dos veículos elétricos, sabendo-se que cada porte de caminhão e veículos leves apresentam lógicas diferentes, o que necessita diferentes investimentos em cada um destes setores. Também visará detalhar as dificuldades encontradas para introdução dos caminhões elétricos no transporte de carga nacional, já que estes ficaram em terceiro plano, atrás dos ônibus e sobretudo, dos carros elétricos, e propor soluções para isto. Além disso, deve-se combinar o perfil dos veículos leves e caminhões utilizados, por capacidade de carga transportada, sejam estes semi-leves, leves, médios, semi-pesados ou pesados, nos diferentes tipos de operação, seja de coleta, distribuição ou transferência, nas etapas de rede de suprimentos e de distribuição física, e entender em que segmento são mais adequados, como por exemplo, alimentos e bebidas, eletroeletrônicos, móveis, papelaria etc. Por fim, o estudo visa propor soluções que apresentem benefícios técnicos e/ou financeiros para as principais barreiras ainda existentes que dificultam a introdução dos veículos elétricos no setor do transporte de carga.

#### 1.4 Justificativa

A poluição do ar leva ao surgimento de doenças pulmonares, cardiorrespiratórias, câncer, males de Alzheimer e Parkinson e a poluição sonora pode levar ao estresse, depressão, surdez, entre outras doenças. O *smog*, neblina escura formada pela poluição e pelo vapor d'água causa problemas respiratórios, irritações na garganta e narinas, e a longo prazo pode levar as pessoas a desenvolverem doenças mais graves. Além disso, prejudica condutores de aviões, helicópteros e veículos rodoviários, inviabilizando o tráfego devido às baixas condições visuais. Em agosto de 2019, o fenômeno ocorreu pela primeira vez no Brasil, na cidade de São Paulo.

Estima-se que na capital paulista cerca de quatro mil pessoas morrem por ano devido a problemas causados pela poluição atmosférica, além de gastos de 1,5 bilhão de dólares pelo governo estadual (Vaz *et al.*, 2015). Os problemas ambientais são responsáveis por cerca de 80% dos casos de pneumonia registrados nas grandes cidades (Chaud *et al.*, 2012). Tais motivos tornaram a melho-

ria da qualidade do ar local uma das principais preocupações a curto prazo para as autoridades por todo o mundo.

A ausência de produção de poluição atmosférica e sonora pelos veículos elétricos reduziria em grande número os investimentos dos governos na área da saúde devido às doenças citadas anteriormente e então, o governo poderia investir os recursos disponíveis em áreas da saúde que apresentem maior necessidade. Sobre isso, deve-se comentar que algumas das desvantagens citadas referentes aos veículos elétricos são os altos custos de aquisição, aluguel e de troca da bateria, porém não são computados nesse cálculo os gastos referentes à saúde pelos governos decorrentes dos problemas causados pelas poluições atmosférica e sonora, o que comprovaria que o veículo elétrico é muito mais apropriado para a população.

### **1.5 Relevância**

A questão da sustentabilidade vem sendo cada vez mais debatida e um importante item a ser resolvido é a questão da poluição atmosférica, que vem causando diversas doenças e trazendo consequências irreversíveis para o planeta, como o aumento das temperaturas. O setor de transportes só perde para as indústrias em emissões de poluentes na atmosfera e soluções vêm sendo testadas com o uso de acionamentos a gás, sendo os principais o gás liquefeito de petróleo (GLP) e o gás natural veicular (GNV), de biocombustíveis, como a introdução do etanol na gasolina e do biodiesel no diesel, mas nenhuma mostra ser tão eficiente quanto investir no desenvolvimento dos veículos movidos a eletricidade.

Assim sendo, o referido tema possui bastante relevância na área de sustentabilidade do setor de transportes, representando oportunidades reais de implementação com sucesso no modelo de mercado brasileiro, através da importação de exemplos de mercados internacionais bem sucedidos no âmbito das políticas públicas que foram fundamentais para que a transição da frota de veículos movidos a combustão para veículos elétricos pudesse ter início nesses mercados. Os aspectos mais relevantes da presente pesquisa deverão estar pautados no estudo de políticas públicas bem sucedidas para que tal transição pudesse ocorrer em outros mercados e em como o governo brasileiro, respeitando a legislação nacional, poderia importar algumas dessas políticas de sucesso para o país.

### **1.6 Metodologia**

A Figura 1 ilustra as principais variáveis da problemática envolvida no

âmbito do cenário em questão, evidenciando as respectivas ligações entre elas e, além disso, como alguns fatores secundários são capazes de estarem conectados com as principais variáveis do problema.

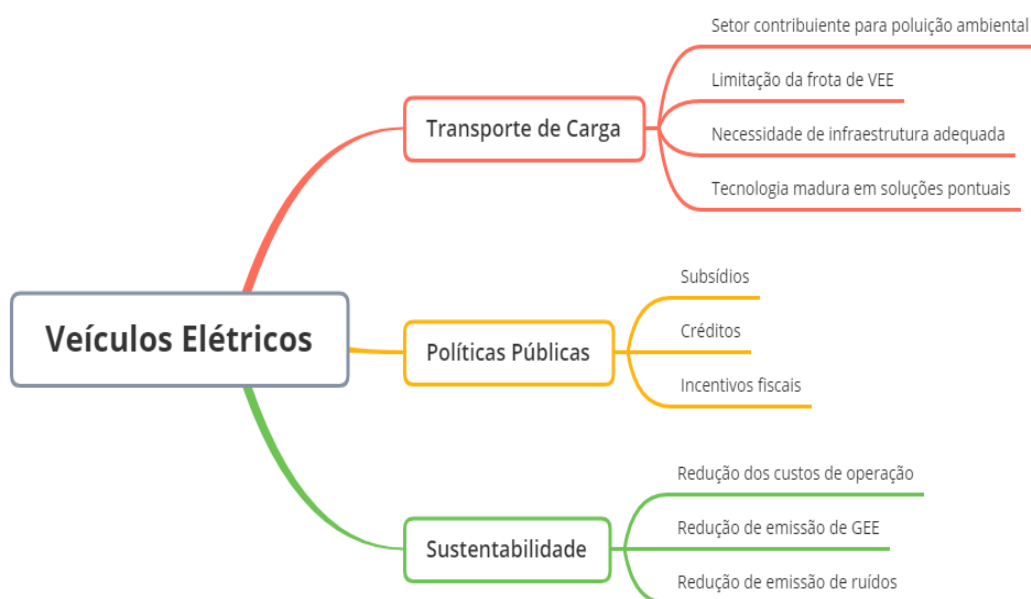


Figura 1 - Mapa Conceitual

Fonte: Autoria própria

As variáveis da problemática são:

- Veículos elétricos para o transporte de mercadorias em ambiente urbano (variável independente): Veículos movidos à propulsão por meio de motores elétricos, compostos por um sistema primário de energia e uma ou mais máquinas de natureza elétrica com sistema de acionamento e controle de velocidade;
- Serviço de transporte de mercadorias por veículos elétricos em ambiente urbano (variável dependente): Trata-se do transporte feito por meio de ruas, estradas e/ou rodovias, visando deslocar as cargas para diversos lugares;
- Políticas públicas (variável interveniente): Conjunto de atividades do governo que age de forma direta ou por meio de delegação, influenciando a vida da população;
- Sustentabilidade (variável dependente): Se refere à respectiva capacidade de sustentação ou conservação de determinado processo ou sistema no âmbito do cenário de estudo em questão.

O aumento ou a redução da aquisição de novos veículos elétricos para o transporte de carga no Brasil é a variável central da problemática e, por extensão, trata-se de uma variável de natureza independente, não sendo influenciada

de forma direta por eventuais alterações nas diretrizes de compras de novos veículos para transporte de carga por parte das empresas que tenham interesse em fazer a transição de sua frota convencional de veículos e, além disso, por novas políticas públicas de incentivo do governo brasileiro que não caminham paralelamente com a expansão da venda de novos veículos elétricos.

No caso brasileiro, há fatores de distintas origens que representam obstáculos para que essa transição de frota de veículos convencionais para veículos elétricos seja mais eficaz. Dentre eles, os fatores econômicos, relacionados com os custos iniciais de investimento e de propriedade dos veículos para as empresas relacionadas. Há também os fatores sociais, relacionados com as doenças ocupacionais, como no caso dos trabalhadores das empresas de coleta de lixo e também riscos de acidentes devido à natureza silenciosa dos veículos elétricos que, em alguns casos, pode impedir até mesmo os pedestres de ouvirem sua aproximação.

Além disso, há também os fatores ambientais que estão diretamente ligados à produção e linha de montagem dos veículos elétricos que ainda é responsável no Brasil por grande emissão de gases GEE, especialmente na confecção das baterias que, além disso, ainda contam com um mercado ineficiente de reciclagem no país, fazendo com que, muitas vezes, seja necessária uma nova linha de produção quando ainda seria possível reaproveitar alguns veículos e seus componentes.

Entretanto, a variável representada pelo transporte de cargas é uma variável de natureza dependente, uma vez que o aumento da frota de veículos elétricos para o transporte de carga afeta substancialmente a qualidade da frota de veículos utilizados no transporte e, além disso, contribui para aprimorar a sustentabilidade (variável dependente) com serviços centrados na preservação do meio ambiente e altamente benéficos para a sociedade brasileira do ponto de vista econômico, social e ambiental.

No âmbito do contexto referente ao transporte de carga e às políticas públicas que, por sua vez, representam uma variável interveniente nesta problemática, tem-se que este setor é responsável por grande poluição no Brasil, ficando atrás apenas do setor industrial no quesito de emissão de gases poluentes para a atmosfera, segundo informam Vaz *et al.* (2015). Desta forma, entende-se que a transição do tipo de frota de veículos movidos a combustão atual é importante e necessária para um futuro mais sustentável. Porém, a frota atual é bastante limitada especialmente no quesito de caminhões e vans, enquanto os veículos elétricos de uso particular já se encontram em um estágio mais maduro

em termos de tecnologia.

Sendo assim, há a necessidade de desenvolvimento da indústria de recarga e de infraestrutura, que está diretamente relacionada com os incentivos fiscais e investimentos por parte de políticas públicas para que as empresas tenham mais interesse em investir na transição de suas respectivas frotas de veículos de transporte de carga. Além disso, esta tecnologia está em estágios de maturação bem distintos em vários setores e, em alguns casos, representa soluções pontuais para os consumidores. Logo, é necessário que as empresas vislumbrem uma infraestrutura por parte do poder público que seja capaz de motivá-las a fazerem um investimento mais grandioso nestes veículos, mas com as condições necessárias para que possam aperfeiçoar suas atividades e torná-las mais sustentáveis no dia a dia.

É possível que o governo brasileiro gere incentivos para a expansão da frota de veículos elétricos para o transporte de carga no Brasil com a implementação de políticas públicas voltadas a: 1- incentivos fiscais para a aquisição de veículos de carga elétricos; 2- implantação de infraestruturas para a transição da frota de veículos de carga movidos a combustão para veículos elétricos; 3- promoção de novos negócios que apoiem o transporte por meio de veículos elétricos.

Foram pesquisados artigos, teses e dissertações que apresentam ligação com o tema proposto, que serão selecionados inicialmente a partir do título e resumo de cada um deles. Após essa seleção, será realizada a leitura destes e serão escolhidos aqueles trabalhos que apresentem uma maior gama de informações a respeito do assunto proposto, em uma análise quali-quantitativa. Também serão pesquisados preços de produção e consumo de energia elétrica junto às distribuidoras, valor de compra dos veículos elétricos junto às montadoras e relatórios técnicos sobre a atual situação dos transportes. Estas etapas serão realizadas com o objetivo de mostrar as barreiras ainda existentes para a introdução dos veículos elétricos no transporte de carga e propor soluções para estas dificuldades.

Os artigos foram pesquisados juntos às bases de dados *Web of Science*, *Science Direct* e *Scopus*, os quais são avaliados criteriosamente, garantindo a qualidade daqueles selecionados como base para o desenvolvimento deste trabalho. A princípio, foram escolhidas 6 palavras-chave: *electric vehicles*, *trucks*, *batteries*, *energy efficiency*, *electric power systems* e *freight transportation*. Como a palavra-chave *electric vehicles* é a que mais apresentou resultados quando colocado o operador booleano “or” com todas as palavras-chave juntas e é a

mais importante no contexto do desenvolvimento deste trabalho, foram usadas combinações suas com o operador booleano “and” com todas as demais. Foram buscados trabalhos no período de 2010 a 2020, devido a apresentarem o que há de mais recente sobre o tema proposto, sem delimitação espacial.

Porém, foi realizada uma revisão das palavras-chave e os termos *batteries*, *electric power systems* e *energy efficiency* foram substituídos por dois novos termos, *urban delivery* e *last mile*, pois apresentaram um número expressivo de publicações e outro motivo que levou a substituição foi que os 3 termos excluídos levam a publicações sobre as formas de produção de energia elétrica e o objetivo principal da dissertação não será esse, e sim demonstrar como essa energia será utilizada no transporte de carga. A palavra-chave *electric vehicles* foi mantida como fonte de combinações com as demais por ser a mais importante no contexto da dissertação, apesar de que neste segundo caso a que mais apresentou resultados com o uso do operador booleano “or” foi *freight transportation*.

A Figura 2 ilustra as principais variáveis da problemática envolvida no âmbito do cenário em questão, evidenciando o roteiro do plano de pesquisa que será desenvolvido a fim de responder à questão central desta problemática.



Figura 2 - Plano de pesquisa

Fonte: Autoria própria

## 1.7 Estrutura

Este trabalho será dividido em mais quatro Capítulos além desta Introdução. No segundo Capítulo, será feita uma revisão bibliográfica mostrando o his-



tórico dos veículos elétricos, no mundo e no Brasil, dados sobre o transporte de carga brasileiro, os tipos de veículos elétricos, as baterias, investimentos realizados mundialmente para a introdução dos veículos elétricos no mercado e dados técnicos sobre os principais modelos de veículos elétricos utilizados atualmente no frete urbano. No terceiro Capítulo, será avaliado como os veículos elétricos devem ser introduzidos nos mais diferentes serviços de transporte de carga, sejam estes entregas urbanas ou a domicílio, coleta de lixo, serviços de correspondências, de longa distância, entre outros. No quarto Capítulo, os resultados serão analisados e serão propostas soluções para viabilizar o uso dos veículos elétricos no transporte de carga, buscando resolver os problemas ainda existentes e sugerir políticas públicas de incentivo à sua introdução no mercado. No quinto Capítulo, será apresentada a conclusão deste trabalho e, logo a seguir, as referências bibliográficas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Histórico dos veículos elétricos

#### 2.1.1 Mundo

Lebkowski (2017) contou que o surgimento dos veículos elétricos ocorreu em 1832, quando o empresário escocês Robert Anderson inventou o primeiro carro elétrico. Porém, Baran e Legey (2011) relataram que só vieram a experimentar um desenvolvimento contínuo no final do século XIX, devido à criação das baterias de chumbo e ácido, que foram desenvolvidas primeiramente pelo belga Gaston Planté em 1859. Essa bateria alimentou os carros elétricos surgidos na década de 1880 nos EUA, Reino Unido e França. Também nesta época, foram desenvolvidos outros dois tipos de baterias: a de níquel-zinco e a de zinco-ar. E em 1901, Thomas Edison, interessado no potencial dos veículos elétricos, desenvolveu a bateria níquel-ferro, com capacidade de armazenamento de energia 40% maior que as de chumbo e ácido, porém com custos de produção muito mais elevados.

Ainda nessa época, foram realizados estudos quanto à tecnologia da frenagem regenerativa, que transforma energia cinética do automóvel em movimento, em energia elétrica, que é restaurada na bateria para uso futuro, e também relativos ao sistema híbrido, composto por eletricidade e gasolina. Em 1895, a empresa americana *Riker Electric Motor Company* começou a produzir os primeiros caminhões elétricos, que eram utilizados principalmente em áreas urbanas para transportar leite, pão, entre outros alimentos, e peças de museus, e em serviços essenciais à sociedade, como policial, ambulância, bombeiro e correios. Atingiam velocidade máxima de 50 km/h e possuíam autonomia de 60 km. Na década de 1900, os veículos elétricos passaram a realizar a entrega de laticínios matinais a famílias em áreas urbanas do Reino Unido e este serviço continua até os dias de hoje.

Porchera *et al.* (2016) e Baran e Legey (2011) contaram que entre 1901 e 1906, foi produzido um modelo híbrido parecido com os modelos paralelos atuais: o motor de combustão interna era utilizado para fornecer tração e carregar a bateria, o motor elétrico fornecia potência extra ao motor a combustão e a parte elétrica funcionava sozinha em trânsito lento. Já em 1903, foi produzido o primeiro automóvel híbrido com as características de um híbrido em série.

Foram criados para compensar a baixa eficiência das baterias utilizadas nos veículos puramente elétricos e a precária estrutura de distribuição de energia elétrica da época. Vaz *et al.* (2015) afirmaram que as áreas rurais não tinham acesso à eletricidade e as urbanas tinham sérias limitações, nas vias públicas havia pouca iluminação e nas residências, apenas os mais ricos tinham acesso. Nesse momento, havia mais veículos elétricos do que a combustão interna circulando nas ruas. Os veículos elétricos possuíam inúmeras vantagens em relação a seus concorrentes, como maior facilidade de operação, pois não requeriam troca de marchas, e ausências de vibração, barulho e odor. Os veículos a gasolina necessitavam do acionamento manual de uma manivela para iniciar a operação, já que a partida elétrica só foi criada posteriormente.

Contudo, mesmo com as vantagens da tração elétrica, as décadas seguintes viram o estabelecimento do motor a combustão interna. Em 1912, Charles Kettering inventou a partida elétrica, eliminando as dificuldades do acionamento manual via manivela e, nessa mesma época, o silenciador foi incorporado ao automóvel, reduzindo muito os ruídos de operação. Neste mesmo ano em Nova Iorque, a frota de automóveis a gasolina já era trinta vezes maior que de elétricos (Baran e Legey, 2011). Em 1913, Henry Ford iniciou um sistema de produção em massa, através de uma linha de produção em série, barateou os custos de produção e permitiu que os veículos a gasolina passassem a custar cerca de US\$ 650, aproximadamente três vezes mais baratos comparados aos elétricos (Vaz *et al.*, 2015), e com isso, os tornou populares, já que anteriormente eram voltados às camadas mais ricas da população. Além disso, a descoberta de reservas de petróleo no Texas, Estados Unidos, tornou a gasolina barata e de fácil acesso, e impediu o desenvolvimento de outras tecnologias. Inúmeros postos de abastecimento surgiram nos EUA e, conseqüentemente, o motor a combustão interna tornou-se o padrão dominante da indústria automobilística.

A partir da década de 1930, os veículos elétricos perderam cada vez mais espaço e passaram a ser produzidos em escala cada vez menor, sendo quase extintos do mercado devido principalmente a quatro desvantagens em relação aos de combustão interna: baixa autonomia; elevado custo de aquisição; dificuldades de recarga, já que a energia elétrica não se encontrava disponível em todas as regiões, além do tempo elevado desta atividade, e de manutenção, já que eram poucos os especialistas destinados a tal função em sistemas com motor e bateria. Baran e Legey (2011) contaram que os VEs continuaram a ser utilizados apenas em algumas cidades dos EUA e do Reino Unido para atividades de entregas, coleta de lixo e distribuição de leite. Também disseram que, em

alguns momentos durante as duas guerras mundiais, houve nesses dois países um racionamento de gasolina e diesel, o que levou ao aumento da produção de VEs nessas ocasiões, o que também ocorreu no Japão no período logo após a segunda guerra mundial, porém a produção voltou aos baixos valores quando o racionamento cessou. Ehrler *et al.* (2020) contaram que em 1942, Berlim ainda utilizava os veículos elétricos individualmente para entregas de alimentos vendidos em padarias e na década de 1950, em frotas para serviço de correios.

Vaz *et al.* (2015) contaram que o domínio dos veículos a combustão interna só foi ameaçado na crise do petróleo entre 1973 e 1974. O embargo dos países da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) resultou na escassez do fornecimento de petróleo e aumento considerável do preço do barril, o que impactou diretamente a gasolina e gerou uma crise de relevância mundial. Antes baratos e abundantes, a crise levou diversos países a repensarem suas políticas em relação aos combustíveis fósseis. Havia claramente a necessidade de maior independência do fornecimento desses insumos e do desenvolvimento de tecnologias alternativas de propulsão, entre essas a elétrica.

Um desses países foram os EUA. Em 1976, foi promulgado o *Electric and Hybrid Vehicle Research, Development, and Demonstration Act*, que autorizou o Ministério da Energia a apoiar projetos de pesquisa e desenvolvimento em veículos híbridos e elétricos. Nessa mesma época, as empresas Sebring-Vanguard e American Motors Corporation apresentaram carros elétricos no mercado. A primeira fabricou um pequeno carro elétrico de uso pessoal, o Citicar, que vendeu cerca de duas mil unidades. A segunda produziu 350 carros do modelo Electruck, veículo comercial leve para uso dos correios americanos, que alcançava uma velocidade máxima de 53 km/h e sua autonomia era de apenas 47 km, em razão do regime de operação de constantes paradas para entregas. Sua recarga levava cerca de oito horas e custava o dobro do preço de um modelo similar movido a combustível fóssil.

No início da década de 1990, as atenções voltaram-se novamente para os VEs. Baran e Legey (2011) disseram que em 1990, o estado da Califórnia, nos EUA, implementou suas primeiras normas regulatórias de emissão zero. Seria definida então uma cota de vendas de veículos sem emissões para as fabricantes de automóveis e a cada veículo desses vendidos, as montadoras receberiam um bônus de US\$ 5 mil. Porém, algumas das principais companhias de petróleo contribuíam financeiramente para campanhas de políticos que se opunham aos veículos elétricos e, devido a isso, o projeto não foi bem sucedido. Em 1992, durante a conferência Rio-92, foi estabelecida a Agenda 21, que consiste

em um plano de ação que deve ser seguido por toda a sociedade em questões relacionadas ao meio ambiente. Neste plano são enfatizadas a gravidade dos problemas causados pelo uso extensivo de combustíveis fósseis como, por exemplo, o aquecimento global e suas consequências; a necessidade dos países desenvolvidos de reduzirem seu consumo de energia e a busca pela transição para fontes renováveis de energia.

O primeiro automóvel híbrido a ser lançado no mercado americano foi o Honda Insight, em 1999, e foi um sucesso imediato. O Toyota Prius, lançado no Japão em 1997, chegou aos EUA em 2000 e teve seu número de vendas muito acima da expectativa da montadora no mercado americano e, mais tarde, no europeu. O veículo impulsionou de vez estes mercados, que passaram desde então a assistir a um grande número de lançamentos de veículos híbridos, inclusive os híbridos *plug-in*, e sobretudo nesta última década, de veículos puramente elétricos, apoiados por incentivos dos governos aos fabricantes e consumidores destes veículos.

Na primeira década de 2000, o governo americano continuou seus investimentos na promoção de energias renováveis e veículos mais limpos, e em 2007 promulgou o *Energy Independence and Security Act*, que destinou US\$ 95 milhões anuais entre 2008 e 2013 à pesquisa e desenvolvimento de um sistema de veículos elétricos e híbridos *plug-in* e também à formação de especialistas no ramo. Em 2009, foi promulgada outra lei, a *American Clean Energy and Security Act 2009*, que determinou que a Secretaria de Energia, as agências reguladoras estaduais e as distribuidoras de energia não regularizadas deveriam apresentar projetos para o desenvolvimento de *smart grids* integradas até julho de 2012. *Smart grids* são redes de distribuição de energia elétrica capazes de comunicar em tempo real os consumidores aos produtores, possibilitando o acompanhamento do fluxo de energia na rede e o controle sobre os aparelhos que consomem eletricidade. Além disso, foram destinados o total de US\$ 50 bilhões às montadoras de automóveis híbridos e fabricantes de autopeças até 2020.

### 2.1.2 Brasil

Uma tentativa inicial de introdução dos veículos elétricos no Brasil foi a criação do Gurgel Itaipu, que possuía uma autonomia entre 60 e 80 km e velocidade máxima de 50 km/h, sendo o primeiro veículo elétrico brasileiro. Porém, seu preço era insatisfatório em comparação aos demais veículos, havia restrições no funcionamento e com o fim da crise do petróleo da década de 1970, que levou os barris de volta ao seu preço normal de venda, este veículo não passou

de um projeto sem sucesso.

O desenvolvimento de veículos elétricos no país manteve-se tímido até os anos 1990, quando questões ligadas à sustentabilidade ambiental, impulsionadas pela Rio-92, ganharam maior relevância, despertando maior conscientização pela melhoria da qualidade do ar nas cidades e consequente busca da redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e poluentes, através da substituição de combustíveis fósseis por energias alternativas e da redução da dependência do petróleo. O Brasil é privilegiado na produção e consumo de energias renováveis, com 81,9% da capacidade instalada de geração de energia elétrica e 87,8% da produção total verificada no país (MME, 2018). Porém, um problema que o Brasil enfrenta é que a maior parte dos principais centros de pesquisa veiculares localiza-se nos países desenvolvidos, e por isso, a adoção de novas tecnologias tende a ocorrer lentamente no país, após sua consolidação nos mercados principais (Vaz *et al.*, 2015).

## 2.2 O transporte de carga no Brasil

### 2.2.1 Frota

No Brasil, os veículos de carga são separados com base no peso bruto total (PBT) em seis categorias: comercial leve (menor que 3,5 toneladas), caminhão semileve (de 3,5 a 6 toneladas), caminhão leve (de 6 a 10 toneladas), caminhão médio (de 10 a 15 toneladas), caminhão semipesado (de 15 a 40 toneladas) e caminhão pesado (maior que 40 toneladas) (Assumpção, 2016). O peso bruto total corresponde à capacidade de carga útil mais o peso da cabine, chassi, carroceria e *powertrain*, que compõem o peso próprio do veículo. A Tabela 1 apresenta a frota brasileira que tem como uma de suas funções principais realizar o transporte de cargas no mês de outubro de 2020, observando-se que as caminhonetes e camionetas podem ser utilizadas apenas para o transporte particular, e também sem contar os veículos que podem ser adaptados para o serviço, como triciclos e bicicletas.

Tabela 1 - Frota brasileira com função de realização do transporte de cargas (Outubro/2020)

Tipo de veículo	Quantidade
Caminhão	2867916
Caminhão-trator	727825
Caminhonete	8223567
Camioneta	3711333
Reboque	1824635
Semirreboque	1063367
Utilitário	1083399

Total	19502042
-------	----------

Fonte: Adaptado de Ministério da Infraestrutura (2020)

Kampker *et al.* (2018) comentaram que os veículos leves até os médios têm sido o foco principal de projetos de pesquisa e desenvolvimento por dois motivos: (1) - a pressão regulatória global para reduzir o tráfego pesado e as emissões em áreas urbanas; (2) - os veículos com estes tamanhos se assemelham com os veículos particulares e de passageiros no setor dos veículos elétricos, muito mais amadurecidos tecnologicamente. Já os caminhões semipesados e pesados emitem 25% do CO<sub>2</sub> global do setor de transportes e há projeções que esse valor irá aumentar, devido ao aumento da demanda previsto (Plötz *et al.*, 2019), e este é mais um fator que leva a urgência da introdução dos veículos elétricos no transporte de cargas.

Quak *et al.* (2016b) relataram que a maioria dos operadores logísticos acreditam que atualmente, os veículos elétricos não conseguem substituir todos os movidos a combustão interna no transporte de cargas, porém os veículos comerciais leves podem conseguir desempenhar tal tarefa se a roteirização, os processos de entrega e o planejamento das viagens forem otimizados e adequados às características dos VEs, aproveitando-se de sua maior eficiência e solucionando suas desvantagens, como a possível necessidade de recarga entre clientes. Além disso, mostraram também que os veículos de capacidade até 3,5t são aqueles que apresentam a menor diferença de preço em relação aos convencionais, custando em torno do dobro do preço de aquisição e estão representados em maior número, enquanto vans maiores ou caminhões normalmente são feitos sob medida ou produzidos em lotes menores. Juan *et al.* (2016) citam como motivo para tal situação as condições de custo atuais e veem como soluções a disponibilidade de baterias de vida útil maior, a tendência ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis e a redução dos preços de compra dos veículos elétricos.

## 2.2.2 Fontes de energia utilizadas

O Brasil ocupa uma posição privilegiada mundialmente no setor energético pelo seu alto índice de produção e consumo de energias renováveis, porém o setor de transporte nacional apresenta baixa eficiência tendo em vista a predominância do modo rodoviário, responsável por 90% das emissões de gases poluentes e de CO<sub>2</sub> (Pessanha *et al.*, 2011). Esses autores citaram também que problemas que ainda impedem uma expansão do mercado de veículos elétricos no Brasil são os elevados preços e um mercado bem desenvolvido de combustí-

veis derivados da cana de açúcar.

Os veículos que têm como base o petróleo são a maioria, com 68,9% do consumo total de energia proveniente de seus derivados, sendo o principal o óleo diesel e o segundo a gasolina (Vaz *et al.*, 2015). Alternativas para substituí-lo vem sendo testadas para combater a dependência ainda existente dos combustíveis fósseis: (1) - por ser uma fonte não-renovável, tem a natureza do seu fornecimento finita; (2) - emissão de poluentes atmosféricos nocivos e GEE. Talebian *et al.* (2018) citaram a situação que vem ocorrendo na Colúmbia Britânica, Canadá, e que se enquadra na situação brasileira, em que outros combustíveis, como etanol e biodiesel, vêm sendo misturados à gasolina e diesel, respectivamente, com a proporção aumentando gradativamente, porém o uso de biocombustíveis vem causando preocupações quanto à segurança alimentar e à manutenção da biodiversidade, além de sua atual quantidade ser insuficiente e a futura ser incerta.

As fontes renováveis seguem se inserindo a passos largos na geração de energia elétrica no Brasil, com a região Nordeste já possuindo 37,2% de sua energia elétrica proveniente de parques eólicos e a geração por fonte solar obteve nos anos de 2016 e 2017 um aumento de 300%, mesmo com a crise enfrentada pelo país (Gomes *et al.*, 2018). A alta produção afasta o risco existente de desequilíbrio das redes elétricas por serem energias intermitentes e também pode ser bastante útil para as temperaturas extremas registradas no país, como o forte calor registrado nos estados do Nordeste e o intenso frio da região Sul, já que nessas condições haverá maior oferta de energia limpa para recarregar os veículos, que apresentarão uma demanda de energia extra devido às maiores perdas que ocorrerão durante a recarga, que levará um tempo maior para ser concluída. As variações regionais e estaduais das emissões de GEE no país provenientes da geração de eletricidade estão de acordo com o mix das fontes que deram origem à energia. O mix com variadas energias renováveis é ainda mais necessário para manter a taxa de emissões zero durante o período noturno, quando não é possível utilizar a energia solar, a não ser que haja um gerador com banco de baterias conectado ao sistema fotovoltaico para armazenar a energia e utilizá-la à noite (BlueSol Energia Solar, 2017). A Tabela 2 mostra os estados brasileiros que possuem maior capacidade de potência instalada das fontes eólica e solar de geração de energia.



Tabela 2 - Estados brasileiros com maior capacidade instalada das energias eólica e solar (2019)

	Fonte Eólica		Fonte Solar
Estado	Capacidade Instalada (MW)		
RN	4159,5	MG	426,5
BA	4074,4	RS	299,6
CE	2045,5	SP	268,0
RS	1831,9	PR	210,1
PI	1638,1	MT	143,5

Fonte: Adaptado de ABEEólica (2019) e Absolar (2020)

A região Nordeste é responsável por aproximadamente 86,4% dos 15,4 GW da capacidade de energia eólica no Brasil, sendo que dos seus nove estados, apenas Alagoas não possui parques eólicos. O país tem 619 parques eólicos, dos quais 523 localizados no Nordeste, com destaque para a Bahia com 165 parques e, em segundo do Rio Grande do Norte, com 154, apesar dos potiguares terem maior capacidade eólica instalada. A região Sul vem em segundo lugar, com 95 parques instalados, estando a grande maioria localizada no Rio Grande do Sul, que possui 80 em seu território. O único parque não localizado nestas duas regiões encontra-se no Sudeste, mais precisamente no Estado do Rio de Janeiro (ABEEólica, 2019).

Outro fator que ajuda o país é a sua produção de eletricidade majoritariamente por hidráulicas, com 61,1% do total (ABSOLAR, 2020). Essas tendências também são observadas em outros países da América Latina, o que evita a emissão de CO<sub>2</sub> em uma abordagem WTW (*Well-to-wheel*), na qual as emissões são computadas desde a produção da energia elétrica até o seu consumo final. Na região, o setor de transportes é responsável por 19% das emissões de CO<sub>2</sub>. Além do Brasil, outro país que apresenta grandes quantidades de energia renovável na região é o Uruguai, com 96,2% da geração total em 2018 (Tanco *et al.*, 2019).

A utilização destas fontes de produção de energia é fundamental, pois além de serem limpas, suprirão a demanda e o consumo extras que serão verificados com a expansão dos veículos elétricos no mercado, o que levará a impactos técnicos, econômicos e operacionais no sistema elétrico e à necessidade de investimentos em projetos de modernização e ampliação das distribuidoras de energia elétrica para garantir a segurança energética dos países. Além disso, se a região conseguir simultaneamente explorar sua crescente matriz de energia renovável e seu sistema de distribuição de energia elétrica, que além de apresentar alta confiabilidade, possui custos menores comparados ao de combustíveis líquidos, os veículos elétricos poderão penetrar em todos os segmentos da

maioria dos países, segundo estimativas deste autor, em cerca de duas décadas.

### **2.2.3 Poluentes atmosféricos e GEE**

As emissões de gases do efeito estufa necessitam ser controladas, pois produzem efeitos irreversíveis para o planeta, como o aumento das temperaturas e a subida do nível do mar. Já os poluentes atmosféricos causam inúmeras doenças que trazem graves riscos à saúde da população. O etanol e o biodiesel, apesar de ajudarem na redução da emissão de poluentes, emitem CO<sub>2</sub> em suas queimas, mesmo que em proporções bem menores que a gasolina, o que comprova que o melhor caminho para combater as emissões de poluentes e GEE dos transportes é a energia elétrica. Feldman (2018) falou que a situação se agrava porque a cana-de-açúcar, ao se desenvolver no campo, absorve da atmosfera esse mesmo dióxido de carbono que é emitido pelo escapamento do automóvel, pois o seu crescimento é a partir do processo de fotossíntese, que precisa do CO<sub>2</sub> que está na atmosfera, o que acaba compensando negativamente em parte os valores da redução de CO<sub>2</sub> emitidos, em uma avaliação da etapa WTT do etanol.

Os caminhões de carga e veículos comerciais leves emitem grande parte dos poluentes atmosféricos, como materiais particulados (MP), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), aldeídos (RCHO), hidrocarbonetos (HC) e compostos orgânicos voláteis (COVs), que prejudicam a qualidade do ar e conseqüentemente, a saúde da população.

#### **2.2.3.1 Materiais particulados (MP)**

São denominados materiais particulados o conjunto de poluentes constituído de poeira, fumaças e materiais sólidos e líquidos que se mantêm suspensos na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho e apresentam características físicas e químicas diversas. Também se formam na atmosfera a partir de gases como dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, que são emitidos principalmente em atividades de combustão, transformando-se em partículas como resultado de reações químicas no ar. O tamanho das partículas está diretamente associado ao seu potencial para causar problemas à saúde, sendo que quanto menores, mais nocivos são os efeitos. Além disso, podem também reduzir a visibilidade na atmosfera (CETESB, 2019).

Além da queima dos combustíveis fósseis, também são emitidos no setor de transportes em obras e pavimentação de vias (MMA, 2020). Os MP provocam doenças cardiorrespiratórias, arteriosclerose e câncer, principalmente nos gran-

des centros urbanos, como São Paulo, onde, na forma de uma poeira mais fina que penetra nos pulmões, apresentam valores por m<sup>3</sup> em torno de 50 microgramas, acima do limite permitido pela OMS, que é de 20 microgramas (Chaud *et al.*, 2012). São classificados como partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis (MP10), partículas inaláveis finas (MP 2,5) e fumaça (FMC), descritos abaixo:

#### **Partículas totais em suspensão**

Definidas como aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a 50 µm. Uma parte destas partículas é inalável e pode causar problemas à saúde e outra parte pode afetar prejudicialmente a qualidade de vida da população, interferindo nas condições visuais do ambiente e prejudicando as atividades normais da comunidade.

#### **Partículas inaláveis (MP10)**

São aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a 10 µm. Dependendo da distribuição de tamanho na faixa de 2,5 a 10 µm, podem ficar retidas na parte superior do sistema respiratório ou penetrar mais profundamente, alcançando os alvéolos pulmonares.

#### **Partículas inaláveis finas (MP 2,5)**

São aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor ou igual a 2,5 µm. Devido ao seu tamanho reduzido, penetram profundamente no sistema respiratório e têm maiores chances que as anteriores de atingir os alvéolos pulmonares. São os materiais particulados mais emitidos pelos transportes rodoviários (Rastani *et al.*, 2019).

#### **Fumaça (FMC)**

Está associada ao material particulado suspenso na atmosfera proveniente dos processos de combustão. O método de determinação da fumaça é baseado na medida de refletância da luz que incide na poeira (coletada em um filtro), o que confere a este parâmetro a característica de estar diretamente relacionado ao teor de fuligem na atmosfera.

#### **2.2.3.2 Óxidos de nitrogênio (NOx)**

Nas grandes cidades, os veículos geralmente são os principais responsáveis pela emissão dos óxidos de nitrogênio. Os altos índices de emissões de NOx dos caminhões a diesel levam à formação do *smog*, que consiste quando o acúmulo da poluição do ar nas cidades forma uma grande neblina de fumaça na atmosfera próxima à superfície, diminuindo a qualidade do ar e a visibilidade no ambiente urbano. Um de seus causadores é o fenômeno da inversão térmica, que consiste na retenção de ar frio próxima à superfície das cidades, com uma

camada de ar quente se formando sobre a cidade. É um fenômeno natural, mas gera problemas ao não permitir que os poluentes atmosféricos se dispersem mais facilmente. Costuma ocorrer em épocas mais frias, quando a radiação solar não é suficiente para aquecer o solo em níveis necessários, por isso, o ar frio da superfície, que é mais pesado, fica parado e dificulta a movimentação do ar (Penna, 2015).

Os óxidos de nitrogênio geram o *smog* fotoquímico, quando participam de reações sob a presença da luz, mais frequentemente em dias muito quentes e secos, e geram outras substâncias altamente prejudiciais à qualidade do ar, como o ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e o ozônio troposférico. Um exemplo disso é o óxido nítrico ( $\text{NO}$ ), que sob a ação de luz solar, se transforma em dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), que através de reações químicas com os COVs, também sob presença da radiação solar, formam oxidantes fotoquímicos como o ozônio ( $\text{O}_3$ ). Também são responsáveis pela formação da chuva ácida e apresentam efeitos sobre as mudanças climáticas que vêm ocorrendo.

Suas fontes podem ser naturais, como os vulcanismos, ações bacterianas e descargas elétricas, ou antropogênicas, como veículos a combustão interna e usinas siderúrgicas. As emissões naturais são em maior escala que as antropogênicas, porém, em razão de sua distribuição sobre o planeta, têm menor impacto sobre as concentrações deste poluente nos centros urbanos. Como principais danos à saúde, levam a problemas respiratórios, pulmonares e agravamento à resposta das pessoas sensíveis a alérgenos (MMA, 2020).

### 2.2.3.3 Ozônio ( $\text{O}_3$ )

É um poluente secundário, ou seja, não é emitido diretamente, mas sim formado a partir de outros poluentes atmosféricos, e é altamente oxidante e tóxico na troposfera. Porém, é encontrado naturalmente na estratosfera, onde tem a função de absorver radiação solar, impedindo que grande parte dos raios ultravioletas cheguem à superfície terrestre. Seus principais danos à saúde são o agravamento dos sintomas de asma, de outras doenças pulmonares como enfisemas e bronquites e cardiovasculares, como a arteriosclerose.

### 2.2.3.4 Óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ )

O mais conhecido é o  $\text{SO}_2$  (dióxido de enxofre), que é um gás tóxico e incolor emitido por fontes naturais ou antropogênicas que pode reagir com outros compostos na atmosfera, formando materiais particulados finos. Sua principal fonte natural de emissão são os vulcões, porém sua maior quantidade se origina das emissões antropogênicas causadas pela queima de combustíveis fósseis

que contenham enxofre em sua composição, como o óleo diesel e a gasolina, em atividades como o uso veicular. Como principais comprometimentos à saúde, agravam os sintomas da asma e demais problemas respiratórios. Também podem reagir com a água na atmosfera formando chuvas ácidas (MMA, 2020) e com outras substâncias presentes no ar formando partículas de sulfato responsáveis pela redução da visibilidade na atmosfera (CETESB, 2019).

### **2.2.3.5 Monóxido de carbono (CO)**

É um gás inodoro e incolor formado quando a queima de combustíveis de origem orgânica, como os combustíveis fósseis e a biomassa, ocorrem em condições não ideais devido a não haver oxigênio suficiente para realizá-la por completo. A maior parte de suas emissões em áreas urbanas são decorrentes dos veículos automotores. Como efeitos negativos à saúde, tem alta afinidade com a hemoglobina no sangue, substituindo o oxigênio e reduzindo a alimentação deste ao cérebro, coração e restante do corpo durante o processo de respiração. Em baixa concentração causa fadiga e dor no peito, em alta concentração pode levar a asfixia e morte (MMA, 2020).

### **2.2.3.6 Aldeídos (RCHO)**

São compostos químicos resultantes da oxidação parcial dos álcoois ou de reações fotoquímicas na atmosfera envolvendo hidrocarbonetos. Mais frequentemente são emitidos na queima de combustível em veículos automotores, especialmente naqueles que utilizam etanol. Seus principais efeitos são a irritação das mucosas, dos olhos, do nariz e das vias respiratórias e podem causar crises asmáticas, além de serem potenciais cancerígenos (MMA, 2020).

### **2.2.3.7 Hidrocarbonetos (HC)**

São compostos formados de carbono e hidrogênio que podem se apresentar na forma de gases, partículas finas ou gotas. São divididos em hidrocarbonetos totais (THC), metano (CH<sub>4</sub>) e hidrocarbonetos não-metano, que correspondem à diminuição do primeiro pelo segundo. São provenientes de uma grande variedade de processos industriais e naturais. Nos centros urbanos as principais fontes emissoras são os carros, ônibus e caminhões, nos processos de queima e evaporação de combustíveis. Também são precursores para a formação do ozônio troposférico e potenciais causadores do efeito estufa através do metano (MMA, 2020).

### **2.2.3.8 Compostos orgânicos voláteis (COVs)**

São gases e vapores resultantes da queima incompleta e evaporação de

combustíveis e outros produtos orgânicos, sendo emitidos pelos veículos, indústrias, processos de estocagem, transferência de combustíveis, entre outros. Muitos destes compostos participam ativamente das reações de formação do ozônio. Dentre os compostos orgânicos voláteis presentes na atmosfera urbana estão os compostos aromáticos monocíclicos como benzeno, tolueno, etil-benzeno e xilenos (CETESB, 2019).

## 2.3 Tipos de veículos elétricos

Os veículos elétricos são aqueles acionados por ao menos um motor elétrico e de acordo com o sistema de propulsão, configurações e fontes da energia elétrica, podem ser divididos em quatro tipos:

### 2.3.1 Híbridos (HEVs)

Veículos híbridos (HEVs) são aqueles que combinam um motor a combustão interna com um ou mais motores elétricos para propulsão e por combinarem os dois tipos, os motores a combustão interna têm menor porte que nas configurações convencionais. Apresentam como vantagens em relação aos veículos convencionais grandes diminuições no consumo e custo de combustível por distância percorrida, das emissões de GEE e poluentes nocivos à atmosfera e do nível de ruídos emitidos. Como desvantagens, apresentam peso e dimensões acima dos veículos convencionais devido à estrutura sofisticada e ao peso da bateria, e também devido a isso, um custo superior de aquisição (Iwan *et al.*, 2014). Os HEVs vêm sendo utilizados na transição para veículos somente elétricos, até que a produção de novos modelos de baterias aumente, e, consequentemente, seus custos, os de ciclo de vida e aquisição dos veículos diminuam. Seu uso reduz a falta de confiança no uso de veículos elétricos por estes serem uma tecnologia ainda em iniciação, minimizando-a. Apresentam eficiência de 30 a 40% maior que os veículos a combustão interna (Vaz *et al.*, 2015).

O motor elétrico, o alternador e a bateria são maiores quanto maior for o nível de hibridização (*micro*, *mid*, *full*) e menor é o motor a combustão. Porém, a bateria não pode ser recarregada diretamente a rede elétrica e o veículo precisa ser abastecido com combustível. O próprio motor a combustão e mecanismos como a frenagem regenerativa, que reduz o consumo de combustível de 25 a 30% (Nicolaidis *et al.*, 2018b) e o desgaste dos freios (Quak *et al.*, 2016b), transmitem a carga para um gerador que recarrega a bateria. O alternador tem como função gerar energia, transformando energia mecânica em elétrica, necessária para recarregar a bateria e alimentar todos os componentes, como o sistema de ignição e os demais equipamentos elétricos (Tribuna do Norte, 2010).

A exceção é dos *Plug-in Hybrid Electric Vehicles*, que diferem daqueles de nível de hibridização *full* por apresentar o motor elétrico, o alternador e a bateria ainda maiores, possibilitando a operação totalmente elétrica, podendo a bateria ser recarregada diretamente na rede. Nicolaidis *et al.* (2018b) falaram que são mais adequados para o transporte de grandes cargas divisíveis e de combustíveis ou líquidos perigosos. Podem utilizar a infraestrutura de CoM (*Charge-on-the-move*) para recarregar em longas distâncias, além de contarem com um motor a combustão interna para recarregar as baterias e fornecer um alcance estendido ao operar fora da rede CoM. Essas operações fora da rede CoM poderiam ser realizadas em velocidades relativamente baixas e portanto, exigiriam menos energia do que as viagens de longa distância em rotas de trânsito rápido. Apresentam custos de aquisição maiores e operacionais menores que os veículos descritos anteriormente.

Vora *et al.* (2017) comentaram que a proliferação de veículos híbridos leves não se repetiu no segmento pesado por várias razões. A principal delas é que a maior consideração dos proprietários de frotas de veículos pesados e dos operadores logísticos é a rentabilidade econômica das operações realizadas, enquanto para os leves, são levados em conta também fatores como conforto, utilidade, estilo e a imagem da marca. Além disso, a diversidade de aplicações dificulta o projeto de um sistema único com bom desempenho para diferentes perfis de carga útil e ciclos de condução.

Os veículos híbridos possuem três tipos diferentes de arquitetura: em paralelo (PHEVs), em série (SHEVs) e serial-paralela (SPHEVs), combinando os recursos e vantagens das duas primeiras.

#### **2.3.1.1 Veículos híbridos serial-paralelos (SPHEVs)**

Borthakur e Subramanian (2018) explicaram que um *powertrain* SPHEV consiste em um motor de combustão interna de tamanho reduzido (ICE), um gerador, um motor de tração, um dispositivo de armazenamento de energia e dispositivos de acoplamento mecânico, como um acoplador de velocidade e outro de torque, arranjo esse que fornece mais flexibilidade na operação do motor em sua região otimizada de velocidade de torque.

O ICE é utilizado para fornecer os requisitos de energia em estado estacionário, enquanto a potência do motor elétrico é projetada para atender à aceleração inicial e percorrer inclinações em baixa velocidade.

#### **2.3.1.2 Veículos híbridos em série (SHEVs)**

Na arquitetura em série, o motor a combustão interna opera o tempo todo

dentro de uma faixa ótima de rotação, acionando o gerador que fornece energia ao motor elétrico, que impulsiona as rodas do veículo, enquanto qualquer excesso de energia é armazenado na bateria.

### 2.3.1.3 Veículos híbridos em paralelo (PHEVs)

O acionamento paralelo é o mais usado e nele, tanto o motor a combustão interna quanto o elétrico impulsionam as rodas do veículo, podendo assim os motores operarem juntos ou um de cada vez de acordo com as condições da estrada. Durante uma viagem lenta na cidade, o veículo utiliza apenas o motor elétrico e quando é necessária mais potência, como por exemplo, para obter maiores velocidades em uma autoestrada, o motor a combustão interna é ligado (Iwan *et al.*, 2014). O motor a combustão interna também é utilizado para recarregar a bateria (Baran e Legey, 2011). É o tipo mais adequado para caminhões semipesados e pesados utilizados em áreas urbanas, por apresentarem maior rendimento (Castro *et al.*, 2013).

### 2.3.2 Veículos elétricos a bateria (BEVs)

Os veículos puramente elétricos possuem a propulsão somente elétrica, sem motor a combustão, sendo alimentados por um ou mais motores elétricos. São denominados *Battery Electric Vehicles* (BEVs), tendo sua energia armazenada na bateria, que alimenta o motor elétrico e assim propulsiona as rodas; e sua recarga feita pela conexão à rede elétrica, através de tomadas de fácil instalação. Juntos com os *Plug-in Hybrid Electric Vehicles*, podem ser denominados *Plug-in Electric Vehicles* (PEVs). Não produzem qualquer tipo de emissão de GEE e poluentes na etapa TTW, porém a energia elétrica usada para recarregar a bateria pode emitir CO<sub>2</sub> se as usinas que a produzem não utilizarem fontes renováveis ou tecnologias de captura de carbono. Apresentam economia de energia superior aos veículos híbridos.

Vaz *et al.* (2015) comentaram que os BEVs abrem oportunidades para novas montadoras e a eletrificação veicular plena tem capacidade de reconfigurar a indústria automotiva. Isso ocorre porque a tração puramente elétrica é mais simples e um motor elétrico tem menos componentes que um motor a combustão interna, ou seja, seu *powertrain* é mais fácil de ser desenvolvido, além de ser menor e mais leve, o que leva a emissões de GEE entre 1 a 2 toneladas menores na sua fase de produção comparadas às de veículos convencionais. O *powertrain* consiste no conjunto entre a bateria, motor e sistemas de transmissão que convertem a energia armazenada no veículo em energia cinética, possibilitando sua movimentação.



### 2.3.3 A célula-combustível (FCEVs)

A recarga de suas baterias é feita por uma célula-combustível, normalmente a hidrogênio, que tem sua energia química convertida em energia elétrica através do processo de oxidação e esta é transferida diretamente para o motor elétrico. Assim como os BEVs, não emitem poluentes e GEE na etapa TTW, porém comparando com os BEVs, apresentam menores reduções na etapa WTW quando comparados aos veículos a combustão interna, devido a maiores emissões em sua etapa de produção, na fase WTT, que deve explorar melhor a eletricidade gerada por fontes renováveis. Hoekstra (2019) demonstrou que outro benefício do hidrogênio é que, quando produzido pelas energias solar ou eólica e utilizado nas fases de produção do aço e do alumínio, torna quase nula as emissões, o que impacta direta e positivamente na fabricação das baterias e seus componentes, dos veículos, painéis solares e turbinas eólicas e beneficia o Brasil, devido ao alto índice de energias renováveis do país. Podem ser classificados de duas formas pela configuração do sistema de energia do veículo: os dominantes a bateria, que possuem uma bateria de grande capacidade e a maior parte de sua energia é extraída da rede elétrica, com o sistema a hidrogênio funcionando como extensor de alcance e os dominantes a célula-combustível, nos quais a bateria é menor e são alimentados principalmente pela eletricidade das células-combustível a hidrogênio.

Os *Fuel Cell Electric Vehicles* (FCEVs) possuem como vantagens a emissão apenas de vapor d'água, recursos naturais de hidrogênio praticamente ilimitados (Assumpção, 2016), autonomia comparada a dos veículos convencionais, entre 300 a 500 km, e por isso são mais adequados para o transporte de cargas (FGV, 2017) e reabastecem muito mais rapidamente, em apenas alguns minutos, semelhantes aos veículos que têm como base o petróleo (Lee *et al.*, 2018).

Como desvantagens, apresentam a dificuldade em manter o hidrogênio no estado líquido no tanque; risco maior de acidente causado por um vazamento de hidrogênio, que faz uma mistura explosiva com o ar, com um ponto de ignição relativamente baixo; falta de infraestrutura para fornecimento de hidrogênio na maioria dos países, com exceção dos Estados Unidos e de Tóquio, capital japonesa (Iwan *et al.*, 2014); além da baixa durabilidade das células de combustível; os elevados volume e peso do sistema de armazenamento de hidrogênio; o aumento de NOx derivado do enriquecimento de hidrogênio (Talebian *et al.*, 2018); e a eficiência média do sistema a hidrogênio está apenas entre 19 a 23% (Nicolaidis *et al.*, 2018b).

Lee *et al.* (2018) mostraram que os FCEVs possuem taxas mais caras de consumo comparadas a dos BEVs, que devem reduzir com economias de escala, que consistem no aumento da produção sem aumento dos custos de produção e com redução do preço de venda; e melhor utilização das estações de reabastecimento de hidrogênio.

#### **2.3.4 Alimentados diretamente pela rede elétrica**

Há veículos que se alimentam diretamente pela rede elétrica pelo sistema de catenária, fazendo com que o veículo se mantenha ligado a ela em movimento, com a ausência de estoque de energia em quantidade suficiente em acumuladores internos nos veículos como as baterias e podem ser denominados RPEV (*Road Powered Electric Vehicle*). Os exemplos mais conhecidos são dos trens e dos antigos bondes. No meio rodoviário, o exemplo mais conhecido são os caminhões *trolley* e foram introduzidos no transporte de carga em 2016, na Suécia (Plötz *et al.*, 2019). Por capacidade de carga, consistem em caminhões médios, semipesados e pesados e suas primeiras aplicações foram para atividades de mineração e próximas a portos. É necessária uma altura mínima do veículo para que este sistema seja utilizado, o que os torna inadequados para carros e por isso, os custos operacionais e de infraestrutura teriam que ser suportados apenas pelo setor de frete. Outros desafios inerentes a estes veículos são que os fios de alta tensão acima da pista podem representar uma ameaça significativa à segurança, sendo que no caso de uma colisão entre um veículo e um poste de apoio na estrada, realizar seu reparo exigiria grande esforço, e por serem uma carga inflexível, seu impacto no sistema de energia é de grande relevância.

Outro modelo de caminhão *trolley*, que vem sendo utilizado, foi demonstrado por Plötz *et al.* (2019), que consiste em um caminhão híbrido, cuja finalidade do motor a combustão interna e da bateria é funcionar como extensor de alcance para operar em estradas com a ausência de linhas aéreas e para permitir a ultrapassagem de outros veículos. As baterias têm autonomia entre 50 a 100 km para a operação conjunta com os motores convencional e elétrico fora do sistema de catenária. Um sistema sofisticado de pantógrafo coleta a energia elétrica dos cabos aéreos que pode conectar e desconectar autonomamente à medida que o veículo entra e sai das seções eletrificadas da estrada. A Figura 3 mostra um exemplo de caminhão *trolley*.



Figura 3 - Exemplo de caminhão *trolley*

Fonte: EVObsession (2015)

Para uma maior substituição dos caminhões convencionais pelos *trolley* no frete urbano, será necessária uma demanda de energia elétrica extra, que deverá ser fornecida pelas usinas de energia. Com grande participação de fontes renováveis na produção de eletricidade, o Brasil está privilegiado nesta situação, com baixas emissões de CO<sub>2</sub> por energia gerada. Plötz *et al.* (2019) afirmaram que o padrão de carga dos *trolleys* mostra uma demanda suave com um leve pico de longa duração durante todos os dias úteis, que farão que a geração de energia extra necessária seja pequena, sendo que se os *trolleys* representassem metade do mercado de veículos elétricos, esse valor seria de apenas 10%. Também disseram que, mesmo na Europa, onde emissões adicionais de CO<sub>2</sub> serão verificadas na etapa WTT, as emissões totais de dióxido de carbono na fase WTW serão reduzidas, o que ocorrerá principalmente pela alta eficiência dos motores elétricos.

## 2.4 Baterias

As baterias são acumuladores elétricos que armazenam energia química que sucessivamente, será convertida em energia elétrica. Naumanen *et al.* (2019) disseram que o progresso das tecnologias das baterias, em toda sua cadeia de valor e economia circular, nas etapas de exploração, mineração, processamento de matérias-primas, design, produção, utilização e gerenciamento no fim da vida útil, determina sua economia e sustentabilidade no ciclo de vida. A maioria dos veículos usa uma bateria de íon de lítio, que vem experimentando uma redução de preço nos últimos anos em decorrência de sua maior utilização (Kawakami *et al.*, 2018), porém ainda apresentam uma baixa energia específica, de 0,1 kWh/kg, contra 12 kWh/kg da gasolina (Nicolaidis *et al.*, 2018b).

São responsáveis pela maior parte do peso dos veículos elétricos, por serem compostas por muitos metais. Quanto maior for o seu número, com o intuito de aumentar a autonomia do veículo, há redução de carga útil, que é compensada pela ausência de partes dos veículos a combustão interna, como a caixa de câmbio e o tanque de combustível, além do motor e sistema de transmissão serem mais leves, compensando em parte a diferença na tara dos veículos. Têm como principais parâmetros de avaliação a vida útil, o tempo de recarga, a densidade energética e a energia específica.

## 2.4.1 Parâmetros das baterias

### 2.4.1.1 Vida útil

A vida útil é baseada no número de ciclos de recarga que uma determinada bateria é capaz de suportar. A bateria deve ser dimensionada para que sua vida útil seja a maior possível de forma a evitar a sua substituição (Assumpção, 2016), cujos custos são muito elevados. Tal fato beneficia principalmente os TCO para frotas de veículos com baterias de maior capacidade. Uma bateria cuja profundidade de descarga seja limitada durante uma viagem, aumenta a vida útil, mantém os valores de alcance e reduz significativamente os custos de recarga do veículo elétrico. A profundidade de descarga corresponde à capacidade de carga retirada da bateria num ciclo e é expressa em percentagem da capacidade nominal desta. Recargas rápidas, realizadas em poucos minutos, são prejudiciais à bateria e necessitam de uma elevada potência da rede, que nem sempre está disponível, o que pode reduzir sua vida útil. Sobrecargas frequentes e manter a bateria por longos períodos com altos valores de SoC (*State of Charge*) também diminuem com o tempo a estabilidade do alcance da bateria. A defasagem algumas vezes ocorrida entre o tempo de vida útil previsto e o real faz com que a participação acionária seja menor que a cota de mercado para determinadas empresas do ramo (Palencia *et al.*, 2017), fato que ocorre também com a autonomia, e é prejudicial para os operadores de transporte durante as operações.

Tanco *et al.* (2019) explicaram que o envelhecimento da bateria se dá por dois aspectos: o calendário e o ciclo. O envelhecimento pelo calendário consiste na degradação da bateria com o decorrer do tempo e depende de fatores como a temperatura e o SoC. Pelo ciclo, o envelhecimento ocorre pela capacidade nominal da bateria que é perdida a cada vez que ela é descarregada e recarregada, e depende da profundidade de descarga, percentual de carga / descarga e tensão. Hoekstra (2019) afirmou que as baterias atuais costumam durar de 1500

a 3000 ciclos e a tendência é que esses ciclos aumentem para valores entre 5000 a 10000 até 2030. A vida útil da bateria termina quando a capacidade ou potência de uma célula, módulo ou pacote perde 20% de sua capacidade nominal, atingindo 80% do seu *State of Health* (SoH) inicial. Taefi *et al.* (2017) afirmaram então, que o tempo e o número de substituições das baterias devem ser considerados nos cálculos de TCO, pois podem prejudicar a competitividade dos VEs de carga.

#### **2.4.1.2 Tempo de recarga**

O tempo de recarga é o tempo que uma bateria completamente descarregada leva para ser totalmente recarregada. Quanto menor o tempo de recarga melhor, pois o veículo precisará ficar menos tempo parado. Veículos elétricos apresentam um tempo de recarga muito alto em relação ao tempo de abastecimento de um veículo a combustão interna, sendo esta uma desvantagem considerável (Assumpção, 2016).

#### **2.4.1.3 Densidade energética**

A densidade energética é a energia armazenada por unidade de volume da bateria, que deve ser a maior possível, proporcionando o uso de menores células ou quantidades de células nos veículos, reduzindo o espaço do banco de baterias e aumentando a carga útil (Assumpção, 2016).

#### **2.4.1.4 Energia específica**

Assumpção (2016) descreveu energia específica como a energia armazenada por unidade de massa. Os valores de energia específica apresentados pelas baterias de veículos elétricos são muito inferiores às utilizadas nos combustíveis convencionais. Porém, já que os veículos elétricos são mais eficientes que os convencionais, esta grande diferença em termos de energia específica acaba sendo compensada.

#### **2.4.2 Tipos de bateria**

Existem diversos tipos de baterias de VEs no mercado, que se diferem em capacidade e quantidade de células.

##### **2.4.2.1 Baterias de íon de lítio**

Zhang e Yu (2019) e Zivancev *et al.* (2018) falaram que as baterias de íon de lítio (LIBs) estão dominando o mercado de veículos elétricos e vêm aumentando seus índices de utilização devido a parâmetros de eficiência muito vantajosos, como altas densidades energética e de potência, longa vida útil, longos

ciclos de carga e descarga, alta tensão nominal, baixa taxa de autodescarga e boa estabilidade, já sendo as mais utilizadas para armazenamento de eletricidade em larga escala e aparelhos portáteis, onde são utilizadas, quase exclusivamente, com a previsão de grande crescimento nos próximos 15 a 20 anos na área da eletrônica de potência e são fundamentais para o crescente suprimento de energia através de fontes renováveis, como solar e eólica. Chen *et al.* (2019) disseram que de 1996 a 2016, as vendas de LIBs aumentaram em média 16% ao ano e que é projetado que em 2025 suas vendas atinjam mais de US\$ 15 bilhões apenas com os BEVs e híbridos. Sua escala crescente de fabricação fez seu preço médio reduzir de 1000 US\$/kWh em 2005 para 200 US\$/kWh em 2016. Sonoc *et al.* (2015) falaram que há uma previsão que por volta de 2030, apenas as baterias de íon de lítio irão satisfazer os requisitos dos veículos elétricos.

Tanco *et al.* (2019) explicaram que seu ânodo é feito de grafite, natural ou artificial, com o metal cobre. Steward *et al.* (2019) falaram que o grafite ainda predomina nas LIBs, mas pesquisadores vêm introduzindo o silício como uma alternativa por suas vantagens de menores custos e maior capacidade de energia. Carvalho *et al.* (2014) ainda demonstraram que o silício é o segundo elemento de maior abundância no planeta, ocupando 28% da crosta terrestre, perdendo apenas para o oxigênio, que ocupa 50% do total. O lítio é o principal componente eletrolítico e do catodo, que é feito de metais ativos que possuem qualidades elétricas, sendo os dois tipos mais comuns nas baterias de BEVs o de óxido de lítio-níquel-manganês-cobalto (NMC) e o de óxido de lítio-níquel-cobalto-alumínio (NCA), que apresentam as maiores vidas úteis, densidades energética e de potência. Hoekstra (2019) demonstrou que enquanto cerca de 43 kg/kWh de GEE são emitidos na fase de produção do catodo NCA, esse valor para o NMC varia entre 37 a 58 kg/kWh, ambos os dados medidos nos EUA.

Essas emissões podem ser menores no Brasil devido ao alto índice de energias renováveis do país. O catodo NMC é dividido igualmente em um terço de níquel, manganês e cobalto e o NCA é composto por 80% de níquel, 15% cobalto e 5% de alumínio. Um eletrólito orgânico e um separador, junto com o ânodo e o catodo, são laminados e comprimidos juntos para criar um contato elétrico entre eles. O eletrólito atua como um componente inerte e os separadores normalmente são feitos de finas folhas de plástico. Diferentes materiais eletrolíticos são utilizados, incluindo um eletrólito não aquoso feito de sais de lítio solubilizado em solvente orgânico, outro aquoso de sais de lítio solubilizado em água e eletrólitos poliméricos.

Steward *et al.* (2019) explicaram que uma ameaça que enfrentam é que a extração atual dos materiais nas minas é limitada a alguns países, criando problemas de disponibilidade, suprimento e variações de preço, além de manter a dependência de importar matérias-primas. Há a perspectiva de dificuldades para realizar o suprimento de lítio e cobalto devido ao enorme aumento da demanda esperado para os próximos anos, combinados com a oferta limitada, o que pode interromper a produção de novos modelos de VEs. A situação será pior no caso do cobalto, porque cerca de 59% da sua produção está concentrada na República Democrática do Congo, onde há graves conflitos étnicos pela exploração do metal. Zivancev *et al.* (2018) apresentaram uma previsão que até 2024, a indústria de baterias demandará a quantidade de lítio que atualmente é suficiente para todas as finalidades. Projeta-se para a próxima década um desenvolvimento em que os catodos sejam mais ricos em níquel e com baixo teor ou livres de cobalto. O catodo NMC passaria a ter 60% ou 80% de níquel e 20 ou 10% de manganês e cobalto (NMC 622 e NMC 811, respectivamente).

Esta tendência é verificada também para os catodos NCA, os mais utilizados nos carros da Tesla, principal montadora mundial de veículos elétricos. Esta medida, junto com a introdução do ânodo de silício, utiliza elementos de maior abundância na natureza para auxiliar no aumento da demanda pelos VEs que será verificado. Além do grafite, mostrado na tabela, o Brasil produz 8,3% do manganês mundial, 3,8% do níquel (USGS, 2017), 3% do silício (Carvalho *et al.*, 2014), e é o 14º maior produtor mundial de alumínio, com uma produção de 659 mil toneladas e representa 1,7% das exportações nacionais (ABAL, 2018). A Tabela 3 mostra os três países líderes na produção de cada material que compõe as LIBs. Tais países são de caráter representativo para o estudo em questão, uma vez que existem outros países com o mesmo potencial, mas que, por ventura, não produzem.

Tabela 3 - Maiores produtores mundiais dos materiais das LIBs

Produto	Países			
	1º lugar	2º lugar	3º lugar	4º lugar
Níquel	Filipinas (11%)	Canadá (10%)	Rússia e Austrália (9%)	2,1 milhões
Manganês	África do Sul (33%)	China (16%)	Austrália (14%)	16 milhões
Cobalto	RD Congo (59%)	Rússia (5,1%)	Austrália (4,6%)	110 mil
Alumínio	China (54%)	Rússia (6%)	Canadá (5%)	60 milhões
Grafite	China (67%)	Índia (13%)	Brasil (8%)	1,2 milhão

Lítio	Austrália (43%)	Chile (32,8%)	Argentina (13,5%)	43 mil
Silício	China (66,4%)	Rússia (9,1%)	EUA (4,7%)	2,1 milhões

Fonte: Adaptado de USGS (2017) e Carvalho *et al.* (2014)

Karasinski (2013) falou que o lítio é difícil de ser encontrado, o que torna o processo caro e muito trabalhoso para que se consiga extrair alguns quilos do elemento. Normalmente se encontram em regiões de características muito peculiares, como áreas vulcânicas e próximas a desertos de sal, como o Salar de Uyuni, na Bolívia, e o Deserto de Atacama, no Chile, países que possuem as maiores reservas mundiais do metal. O Chile possui a segunda maior reserva de lítio e ocupa a mesma classificação na produção, atrás da Austrália, e a Bolívia ainda estuda como explorar o recurso no qual possui a maior reserva mundial, o que pode lhe proporcionar grandes benefícios no futuro. Devido às particularidades da localização, desenvolveu-se uma nova forma de extrair o elemento. Mundi (2016) demonstrou que o lítio costuma ser encontrado a cerca de 45 metros de profundidade e não é encontrado em estado nativo, mas sim dissolvido em água salgada na forma de uma salmoura de lama grossa, e toda a matéria-prima é bombeada para a superfície e derramada em piscinas rasas de evaporação, e são secas devido ao forte calor dos desertos, que também faz com que o material atinja um alto grau de saturação, a água seja evaporada e o lítio obtido com alto grau de concentração química. O processo tem duração de tempo entre 1 a 2 anos e varia de acordo com o local em que é realizado, e sua concentração chega a atingir níveis 60 vezes maior que no momento em que foi primeiramente extraído. Após isso, o lítio é refinado e separado de outros materiais como o sódio. A Figura 4 mostra as piscinas utilizadas nesse procedimento.



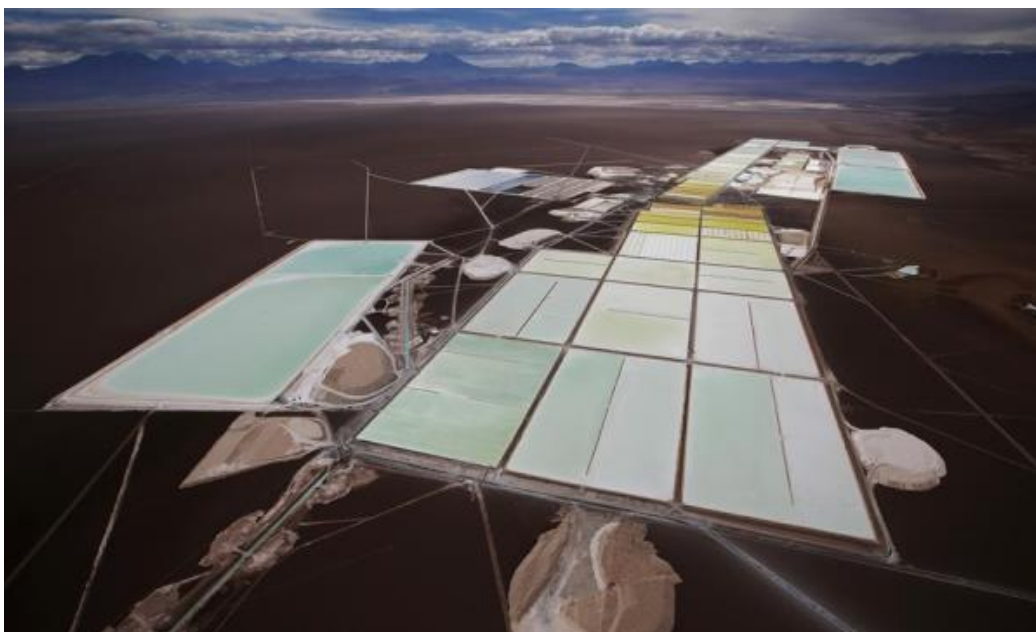


Figura 4 - Piscinas utilizadas no processo de extração do lítio

Fonte: Karasinski (2013)

As baterias de íon de lítio, quando utilizadas nos VEs, normalmente duram cerca de seis anos (Pelletier, 2014 *apud* Quak *et al.*, 2016a) e há uma perspectiva que este tempo aumente para oito a dez anos. São classificadas como materiais perigosos da categoria 9 (substâncias e artigos perigosos diversos) devido às suas qualidades térmicas e elétricas instáveis, porque contém uma alta porcentagem de metais pesados perigosos (Zivancev *et al.*, 2018) e ao risco de fuga térmica se manuseados incorretamente durante o transporte, por isso devem passar por rigorosos testes antes do envio por vias terrestres, aéreas ou marítimas, que ainda enfrentam aumento dos custos devido à classificação (Chen *et al.*, 2019). Quando a bateria é recarregada, os elétrons são agrupados em uma unidade de armazenamento de carbono, onde ficam presos até o momento em que se ligam a um eletrólito repleto de sais de lítio, que permite que voltem a fluir de forma controlada para dentro da corrente e alimentem os equipamentos. Os problemas ocorrem quando um pequeno defeito ou dano é sofrido pelos finos separadores que impedem que elementos da bateria entrem em contato direto, levando a um curto-circuito interno e, consequentemente, ao rápido acúmulo de calor. Esse calor causa a “fuga térmica”, na qual a bateria fica superaquecida e pode entrar em combustão, o que pode fazer com que células adjacentes também fiquem excessivamente quentes, originando uma perigosa reação em cadeia que pode causar um incêndio (Rocha, 2015), um grave problema que precisa ser superado com a evolução tecnológica das baterias. O ideal seria que fossem inertes ou recicladas internamente. Sua temperatura de trabalho

deve ser controlada abaixo dos 50° C para evitar que a capacidade da bateria seja reduzida (Zhang e Yu, 2019). Em muitos dos carros elétricos atuais, diferentes variações desta bateria são aplicadas, com base, entre outros, em fosfatos, titânio e espinélio (óxido de magnésio e alumínio), o que ajuda a aumentar sua eficiência e vida útil (Iwan *et al.*, 2014).

As desvantagens desse tipo de bateria são o comprometimento de seus parâmetros ao longo do tempo e sua produção envolve componentes muito nocivos e relativamente dispendiosos. É baseada em dois eletrodos: um feito de carbono poroso e o outro de óxidos de metal (cobalto, lítio ou ambos, no catodo LCO) e produzem 3,6V em uma única célula. Podem acumular o dobro de energia em comparação com as baterias de níquel-hidreto metálico e não apresentam o risco de sofrerem problemas devido ao “efeito memória”, que consiste em uma queda abrupta na voltagem fornecida pela bateria próximo ao ponto em que quase não resta mais nenhuma carga, originado quando as baterias não são descarregadas até o limite mínimo de tensão ou quando são mantidas no carregador em funcionamento além do tempo necessário para recarga. O carregador começa a provocar mudanças químicas na estrutura da bateria, mudando o hidróxido de níquel de sua forma de cristais ‘beta’, que produz mais energia, para sua forma de cristais ‘gama’, que produz menos energia, fazendo com que estas partes passem a enviar corrente durante o uso com uma voltagem menor (Siqueira, 2019). Apresentam altos valores de energia específica, de 150 Wh/kg (Assumpção, 2016) e de densidade energética, de 150 a 200 Wh/l (Margaritis, 2016), quando comparadas a outras baterias, porém ainda é necessário que esses valores sejam maiores.

Outro problema que enfrentam é que a reciclagem do lítio das baterias após o término de sua vida útil ainda não é habitual e pouco foi reciclado ao longo dos últimos anos, com taxas inferiores a 1%, o que ocorre porque o preço do lítio reciclado é até 5 vezes mais caro do que outros processos a base de salmoura (Tanco *et al.*, 2019). Com uma taxa de reciclagem de 100% das LIBs, em torno de 90% do lítio seria recuperado, o que garantiria o suprimento necessário para todo o século XXI junto à extração de lítio realizada (Sonoc *et al.*, 2015). O processo mais adequado para a recuperação do lítio é a moagem criogênica, que consiste quando se utiliza nitrogênio líquido para diminuir a temperatura do elemento e reduzi-lo a um tamanho de partícula (AVEKA, 2020). Um aspecto positivo é que o crescente uso deste tipo de bateria nos veículos elétricos vem aumentando seu total de reciclagem, com a capacidade global total para fabricação de LIBs de veículos crescendo de 31 GWh em 2016 para valores entre 120

a 549 GWh em 2020 (Wang *et al.*, 2020), o que exigiu mais de 550000 toneladas dos materiais lítio, cobalto, manganês, níquel e grafite somados.

Na União Europeia, a reciclagem de VEs em fim de vida útil atingiu 95% em 2015, para recuperar peças e principalmente os metais que constituem as baterias. Em 2016, foram geradas entre 8 a 9 milhões de toneladas na região e entre 80 a 100% dos materiais dos veículos foram recuperados ou reciclados. No mesmo ano, mais de 94000 toneladas de baterias foram recicladas mundialmente, sendo 50% na Europa e 33% na China. Nos EUA, quase todos os automóveis são reciclados e aproximadamente 86% dos materiais dos veículos são recuperados ou utilizados para produção de energia (Steward *et al.*, 2019). Com o crescimento das LIBs no mercado, é necessário garantir a disponibilidade de infraestrutura para quando as necessidades de reciclagem atingirem maiores volumes. Economias de escala devem ajudar a reduzir os custos de reciclá-las e tornar o processo ainda mais econômico comparado à extração de novos materiais. Chen *et al.* (2019) disseram que a reciclagem de LIBs é de fundamental importância por três razões principais: reduzir as incertezas associadas à flutuação dos custos de material, equilibrar as desiguais distribuição e produção de materiais essenciais e abordar a situação do seu transporte.

À medida que as baterias de íon de lítio se tornaram as líderes em utilização nos veículos elétricos, aumentou o número de pesquisas cujos objetivos são melhorar seu desempenho e reduzir custos. Steward *et al.* (2019) citaram que os esforços das pesquisas estão concentrados em seis áreas: reduzir as dimensões dos materiais ativos, que são aqueles que sofrem redução ou oxidação, para melhorar o transporte de íons e aumentar a estabilidade mecânica; melhorar as propriedades mecânicas dos meios condutores; ajustar a química das baterias para melhorar o transporte de elétrons; aumentar as estabilidades química e térmica; ajustar a morfologia das partículas; e desenvolver revestimentos para reduzir a decomposição de materiais ativos e as modificações de soluções eletrolíticas. Zhang e Yu (2019) falaram que o aumento na sua utilização, ao mesmo tempo que está aumentando a potência e diminuindo o volume, está aumentando também o calor, o que pode colocar em risco a vida útil e a segurança das baterias.

Steward *et al.* (2019) demonstraram que as previsões para as próximas décadas são de alterações na química das baterias, pois atualmente já se investiga ânodos de metal de lítio, baterias de estado sólido que empregam eletrólito inorgânico ou polimérico e baterias de lítio-enxofre com catodos contendo altos volumes de enxofre. Hoekstra (2019) mostrou que esta última tem custos e im-

pactos ambientais menores que as de íon de lítio. Também mostrou que avanços como o eletrólito sólido aumentarão a vida útil e, por consequência, a distância percorrida pelos veículos, e também tornarão as baterias não inflamáveis.

#### **2.4.2.2 Baterias de chumbo-ácido**

Historicamente, as mais antigas, inventadas em 1859, consistem em várias células de chumbo-ácido conectadas em série que geram energia eletromotriz ao nível de 2,1V (soma de todas as células). Como vantagens, seu processo de reciclagem é mais fácil que nas de íon de lítio, por apresentarem uma única fórmula química e é lucrativo porque o chumbo reciclado possui alta pureza e pode ser reciclado novamente após o fim da vida útil das novas baterias, enquanto a solução eletrolítica é drenada e sujeita a processamento químico adicional (Steward *et al.*, 2019). Também possuem a resistência interna pequena, tornando possível o fluxo de grandes correntes, motivo pelo qual as baterias de chumbo-ácido são aplicadas juntas ao motor a combustão interna nos veículos híbridos. Suas principais desvantagens são o peso relativamente alto e risco de vazamento de eletrólito (Iwan *et al.*, 2014). Apresentam baixa densidade energética, variando entre 50 a 82 Wh/l, e também limitada energia específica, com valores entre 18 a 56 Wh/kg (Assumpção, 2016).

#### **2.4.2.3 Baterias de níquel-hidreto metálico (NiMH)**

As baterias de níquel hidreto-metálico são caracterizadas por uma menor eficiência, que corresponde a 65% do total das de chumbo-ácido, são muito mais leves e oferecem uma vida útil mais longa, podendo ser utilizadas excepcionalmente por longos períodos, por exemplo, as baterias usadas em carros híbridos duram cerca de 10 anos e percorrem a distância de 160000 quilômetros (Iwan *et al.*, 2014). No entanto, sua capacidade cai consideravelmente em baixas temperaturas, apresentando um alto nível de autodescarga e exigem um ciclo de recarga especial. Apresentam altos valores de densidade energética, variando entre 152 a 215 Wh/l, e energia específica entre 54 a 80 Wh/kg, segundo Assumpção (2016).

#### **2.4.2.4 Baterias Zebra**

As baterias Zebra são baseadas em cloreto de alumínio fundido e cloreto de sódio como eletrólitos, formando o tetracloroaluminato de sódio ( $\text{NaAlCl}_4$ ). A tecnologia é por vezes referida como "tecnologia de sal quente", devido à necessidade de aquecer a bateria antes de usá-la e são caracterizadas por uma durabilidade considerável (milhares de ciclos de recarga). As desvantagens desta

solução são esta necessidade de aquecer a bateria antes de utilizá-la e de mantê-la numa temperatura especificada (cerca de 270°C), o que leva a custos adicionais, e a baixa densidade de potência, ao nível de 120 W/l (Iwan *et al.*, 2014).

## 2.5 Investimentos e projetos realizados pelo mundo

Muitos países ao redor do mundo vêm tomando medidas ambiciosas para reduzir as emissões de GEE originários dos transportes. Pessanha *et al.* (2011) comentaram que políticas públicas aliadas às estratégias financeiras em diversos países demonstram uma tendência mundial crescente e irreversível de penetração dos VEs, às quais se juntam a necessidade de conter a dependência dos combustíveis fósseis, os poluentes originados da sua queima e a emissão de gases do efeito estufa. Steward *et al.* (2019) mostraram que a taxa de crescimento anual de vendas entre 2017 e 2020 é de cerca de 56% para híbridos *plug-in* e de 42% para BEVs, comprovando que os veículos híbridos estão sendo utilizados como transição no caminho para os totalmente elétricos.

Fiori e Marzano (2018) demonstraram que a meta da União Europeia (UE) é reduzir em 80% suas emissões de gases de efeito estufa até 2050 em relação aos níveis de 1990, e Rastani *et al.* (2019) disseram que para o setor de transportes, a meta é de 60%, reduzindo pela metade o número de veículos a combustão interna até 2030 e eliminá-los no ano de fim da meta. Para os principais centros urbanos, a meta é que a atividade de logística esteja livre das emissões de CO<sub>2</sub> até 2030. Baran e Legey (2011) comentaram que em 1992, o bloco econômico definiu sua política de transportes através da expressão “uma estratégia para a mobilidade sustentável”. Kampker *et al.* (2018) afirmaram que a União Europeia pretende reduzir os valores de emissões de CO<sub>2</sub> para veículos semipesados e pesados em 15% para 2025 e em ao menos 30% para 2030, comparadas aos valores de 2019.

Ehrler *et al.* (2020) comentaram que 10 prefeitos de capitais da União Europeia em conjunto solicitaram que as emissões de carbono dos transportes da região até 2050 tenha zero como meta. Também falaram que o bloco econômico lançou o projeto *Green eMotion* para promover o uso de fontes renováveis no transporte rodoviário, incluindo o uso de VEs em 2011, em Bruxelas. Juan *et al.* (2016) falaram que na região foi desenvolvido um sistema de tributação de uso da infraestrutura utilizando o princípio “usuário e poluidor - pagador”, como por exemplo, maiores tarifas de pedágio em áreas montanhosas. O grupo de países da organização acredita que essas medidas reduzirão a dependência dos transportes europeus dos combustíveis fósseis, que é de 94%, sendo 84% des-

tes importados (Atualidade Parlamento Europeu, 2013). Porém, da mesma forma que ocorre no Brasil, as políticas quanto aos veículos elétricos de carga ficaram relegadas em comparação aos veículos particulares, já que os subsídios governamentais para a aquisição do segundo não se aplicam aos veículos elétricos de maior capacidade de carga, sendo utilizados apenas para veículos comerciais leves. Esses incentivos contribuíram para que em 2017 houvesse um aumento de 37% nas vendas de veículos elétricos particulares em comparação com o mesmo período do ano anterior na UE, porém isso representa uma participação de mercado total de apenas 1,4%.

Naumanen *et al.* (2019) demonstraram que a União Europeia implementou medidas para o progresso das tecnologias de baterias com seis objetivos: garantir o acesso às matérias-primas de países ricos em recursos fora da região; apoiar a fabricação de células de baterias em larga escala na região e uma cadeia de valor competitiva, reunindo os principais agentes da indústria e as autoridades nacionais e regionais; reforçar a liderança industrial apoiando a investigação e introdução de tecnologias disruptivas; desenvolver e fortalecer uma força de trabalho altamente qualificada em sua cadeia de valor; apoiar a fabricação de células de bateria com a menor pegada ambiental possível; e garantir consistência com uma estrutura mais ampla de habilitação e regulamentação em apoio à implantação de baterias e armazenamento de energia. O projeto é denominado Plano de Ação Estratégico sobre Baterias. Para a fabricação de células com baixa pegada ambiental e sua posterior colocação em módulos e pacotes, Hoekstra (2019) demonstrou estudos que estimam a produção de altos volumes com emissões de GEE de apenas 2 a 5 kg/kWh.

Talebian *et al.* (2018) mostraram que na Colúmbia Britânica, Canadá, há a meta de reduzir na mesma quantidade as emissões até 2050, só que comparadas aos valores de 2007, reduzindo as emissões dos veículos de frete em 50% até 2027 em relação aos níveis de 2010, porém um problema para que este objetivo seja cumprido é a previsão de crescimento de 20% do PIB na província, o que está diretamente ligado ao aumento do número de caminhões de carga e seria difícil com isso obter a meta desejada e garantir simultaneamente o crescimento econômico.

Kawakami *et al.* (2018) citaram que a meta japonesa até 2050 é reduzir as emissões de GEE em 80% em relação aos níveis de 2016 e em 26% no período de 2013 a 2030. Porém, Palencia *et al.* (2017) comentaram que apesar da implantação em larga escala dos veículos elétricos, há a previsão que a gasolina e o diesel ainda representarão mais da metade da energia consumida em 2050,

o que impediria a realização das metas de redução de emissões de GEE e evidenciaria a dificuldade de descarbonizar o transporte rodoviário de mercadorias.

Tanco *et al.* (2019) discutiram sobre a América Latina e comentaram que uma barreira que a região ainda enfrenta à expansão e uso dos VEs é a diferença de regulamentos e incentivos pelos países: nas regras, enquanto o Chile adotou o plano Euro VI de redução de emissões, o Uruguai ainda não tem nenhum regulamento neste aspecto. Nos incentivos, o Brasil e a Colômbia têm isenções de IVA (Imposto sobre Valor Agregado) para BEVs, enquanto Argentina, Chile e Uruguai não. Isenções de tarifas de importação também existem somente em alguns países.

Iwan *et al.* (2019) escreveram que a adoção dos VEs nos países em desenvolvimento tem características e problemas próprios. Mudanças nas prioridades políticas, nas estruturas governamentais e regulatórias, com a ausência de continuidade de muitos projetos após trocas no governo; benefícios da legislação e subsídios a combustíveis fósseis para apoiar objetivos políticos; taxas instáveis de desenvolvimento; altas taxas de juros; velocidades de difusão tecnológica e de transição dos sistemas logísticos tradicionais para os modernos menores; alterações contínuas na estrutura competitiva das indústrias de veículos e de logística; incertezas a longo prazo na estrutura do mercado, e, quanto à extensão e natureza das restrições às emissões de carbono, o que atrapalha os investimentos nos VEs dos fabricantes de veículos. Embora adotem medidas políticas diferentes, apresentam tendências comuns como regulamentação pesada do estado e controle sobre o comércio, preços e capacidade e mudanças recentes em direção à desregulamentação e privatização. Entre os países em desenvolvimento, apenas a Índia adotou os VEs como uma prioridade.

Os veículos elétricos têm potencial para serem cada vez mais importantes para o equilíbrio das balanças comercial e energética dos países. Atualmente, muitos países têm a capacidade de produzir energia elétrica para satisfazer as suas necessidades e investimentos cada vez maiores em veículos elétricos faria com que reduzissem em grande quantidade suas importações de energia (Porchera *et al.*, 2016). A Tabela 4 demonstra investimentos nas áreas financeira e de infraestrutura pelo mundo para o estímulo à produção e comercialização de veículos elétricos ou híbridos.

Tabela 4 - Investimentos financeiros e em infraestrutura pelo mundo

Alemanha	
<b>Financeiros</b>	- Isenção de taxas de licenciamento.
<b>Infraestrutura</b>	- Quatro regiões foram escolhidas para demonstração de elétricos puros e híbridos

<i>plug-in.</i>
<b>China</b>
<b>Financeiros</b> - Subsídios para a compra de veículos de até 60 mil yuans (cerca de US\$ 10 mil).
<b>Dinamarca</b>
<b>Financeiros</b> - Isenção de impostos de registro e de licenciamento. <b>Infraestrutura</b> - 70 milhões de coroas dinamarquesas (cerca de US\$ 11 milhões) para o desenvolvimento de infraestrutura de recarga.
<b>Espanha</b>
<b>Financeiros</b> - Subsídios de até 25% no preço do veículo antes dos impostos no montante de até € 6 mil (cerca de US\$ 7 mil). <b>Infraestrutura</b> - Incentivos públicos para um projeto-piloto de demonstração. Incentivos para instalação de infraestrutura de recarga em colaboração entre os governos federal e regionais.
<b>Estados Unidos</b>
<b>Financeiros</b> - Até US\$ 7,5 mil em crédito no valor de venda, de acordo com a capacidade da bateria. Há redução progressiva até o fabricante atingir duzentos mil veículos produzidos. Também há incentivos por parte de alguns estados. <b>Infraestrutura</b> - Crédito de imposto de 30% do custo para instalações comerciais de pontos de recarga (limite de US\$ 30 mil). Crédito de imposto de até US\$ 1 mil para instalações residenciais. US\$ 360 milhões destinados à infraestrutura em projetos-piloto.
<b>Finlândia</b>
<b>Financeiros</b> - € 5 milhões (cerca de US\$ 6 milhões) destinados ao programa nacional de desenvolvimento de veículos elétricos. <b>Infraestrutura</b> - € 5 milhões (cerca de US\$ 6 milhões) destinados à infraestrutura no âmbito do programa nacional de desenvolvimento de veículos elétricos.
<b>França</b>
<b>Financeiros</b> - € 450 milhões (cerca de US\$ 500 milhões) em descontos concedidos aos consumidores que comprarem veículos eficientes, com 90% desse montante advindo de taxas sobre os veículos ineficientes e 10% de subsídios diretos. <b>Infraestrutura</b> - € 50 milhões (cerca de US\$ 60 milhões) para cobrir 50% do custo com infraestrutura de recarga (equipamento e instalação).
<b>Holanda</b>
<b>Financeiros</b> - Redução de impostos no valor de 10% a 12% do custo do veículo. <b>Infraestrutura</b> - Quatrocentos postos de recarga apoiados por incentivos.
<b>Índia</b>
<b>Financeiros</b> - Subsídio de 100 mil (cerca de US\$ 2 mil) ou 20% do preço do veículo, prevalecendo o que for menor. Incentivos fiscais para elétricos puros e híbridos <i>plug-in</i> . <b>Infraestrutura</b> - Há planos para facilitar a instalação de postos elétricos.
<b>Itália</b>
<b>Financeiros</b> - Isenção de taxas de licenciamento nos primeiros cinco anos. A partir do sexto ano, o desconto é de 75%.
<b>Japão</b>
<b>Financeiros</b> - Isenção de taxas de aquisição e sobre o peso do veículo. Incentivos de até ¥ 850 mil (cerca de US\$ 8 mil) para a compra de elétricos puros e híbridos <i>plug-in</i> . <b>Infraestrutura</b> - Apoio para custear até 50% do custo do equipamento de recarga, limitado a até ¥ 1,5 milhão (cerca de US\$ 12 mil) por carregador.
<b>Noruega</b>
<b>Financeiros</b> - Isenção de impostos de compra (IVA) e de licenciamento.



Isenção de impostos de importação para elétricos puros. <b>Infraestrutura</b> - Governo investiu cerca de € 6,5 milhões na construção de dois mil postos de recarga. Em 2013, 4,5 mil postos já estavam disponíveis.
<b>Reino Unido</b>
<b>Financeiros</b> - Subsídio de 25% no preço do carro até o máximo de £ 5 mil (cerca de US\$ 8 mil) e de 20% no custo de um comercial leve até o máximo de £ 8 mil (cerca de US\$ 12 mil), desde que o veículo emita menos que 75 g CO2/km. Há também isenção de taxas para veículos elétricos puros. <b>Infraestrutura</b> - 37 milhões de libras (cerca de US\$ 55 milhões) destinadas a postos de recarga públicos, residenciais e em ruas e rodovias.
<b>Suécia</b>
<b>Financeiros</b> - Isenção de taxa de licenciamento nos primeiros cinco anos. Subsídios de € 4.500 (cerca de US\$ 5 mil) no preço de veículos que emitam até 50 g CO2/km. Equalização do valor tributável do veículo de baixa emissão ao do correspondente diesel/gasolina para frotas de empresas. <b>Infraestrutura</b> - Apoio por meio de fundo para pesquisa, desenvolvimento e demonstração. Não há incentivos mais amplos para infraestrutura.

Fonte: Adaptado de Vaz *et al.* (2015)

Quak *et al.* (2016a) apresentaram o projeto FREVUE (*Freight Electric Vehicles in Urban Europe*), que opera na logística de oito cidades europeias com 127 veículos, que variam de pequenas vans derivadas de carros a caminhões semipesados, e entregam os mais variados tipos de mercadorias, incluindo alimentos, farmacêuticos, embalagens e materiais de construção, e também realizam a coleta de resíduos, utilizando sistemas de monitoramento e telemáticos avançados, contendo dados da logística, comunicação, informação e rastreamento em todas as etapas da cadeia de suprimentos, aumentando a confiabilidade e aceitação dos VEs. O sucesso do projeto faz com que vários de seus operadores se comprometam a aumentar o número de VEs utilizados em seus negócios.

Iwan *et al.* (2019) apresentaram o projeto EUFAL (*Electric urban freight and logistics*), que tem como objetivo principal conectar e fornecer as informações necessárias entre os agentes do negócio dos VEs de carga, como órgãos públicos, operadores de transporte, gerentes de frota e empresas de logística, para que possam aplicar as adaptações necessárias ao uso dos VEs em seus aspectos técnicos e financeiros.

Foltynski (2014) apresentou o projeto ENCLOSE (*Energy Efficiency in City Logistics for Small and Mid-Sized European Historic Towns*), que tem como objetivo atender às necessidades e requisitos para obter uma logística urbana viável, sustentável e com eficiência energética a longo prazo nas cidades históricas europeias de pequeno e médio portes, obtendo as melhorias através da implementação e operação de políticas, medidas, planos e abordagens estruturais adequados especificamente para esse tipo de ambiente urbano e seus arredos.

res. Foram testados BEVs, híbridos *plug-in* e veículos a biogás para determinar a melhor opção, avaliando seus impactos, ciclos de vida e benefícios. Esse projeto foi desenvolvido porque estas cidades ficaram atrasadas em relação às capitais e outras grandes cidades europeias devido à escassez de recursos, falta de estrutura organizacional e de apoio institucional para desenvolver projetos inovadores; e devido às suas complexas configurações urbanas, caracterizadas por ruas estreitas, onde muitas têm tráfego restrito com sistema de mão única e limite de velocidade e outras são destinadas apenas para pedestres, o que dificulta os fluxos da mobilidade e distribuição de cargas, além de seus habitantes estarem mais sujeitos aos impactos da poluição. Principalmente, para as cidades pequenas, parcerias com associações e partes interessadas locais são fundamentais para o desenvolvimento do projeto. Onde o acesso de veículos é restrito, apenas comerciantes locais, veículos de carga para entregar as mercadorias, turistas e residentes são permitidos. Atende 13 países: Áustria, Bulgária, Espanha, Grécia, Holanda, Irlanda, Itália, Noruega, Polônia, Portugal, Reino Unido, Romênia e Suécia.

Neste projeto, primeiramente houve projetos-piloto em 's-Hertogenbosch (Holanda), Lucca (Itália) e Trondheim (Noruega) e verificadas suas viabilidades, foram implementados em cidades da Bulgária, Espanha, Grécia, Portugal, Reino Unido e Romênia, promovendo e aprimorando as redes de cidades do projeto através do intercâmbio de experiências. Esse método utilizado foi fundamental para cidades europeias, tomadores de decisão e demais agentes de logística. Áustria, Irlanda, Polônia e Suécia possuem agências filiadas ao ENCLOSE que são especializadas em eficiência energética, energias renováveis e novas tecnologias para as logísticas locais, e são o elo para que o projeto seja implementado no futuro nestes países. O projeto visa fornecer elementos para estimular níveis institucionais nacionais, regionais e da União Europeia e estruturas legislativas e de incentivo necessárias para a adoção dos planos logísticos de sustentabilidade urbana.

Chaud *et al.* (2012) citaram o projeto "*La Petite Reine*" que surgiu em 2001 em Paris e consiste em um sistema de entrega e de recolhimento de bens do consumidor final efetuado com veículos elétricos, dentre os quais bicicletas e triciclos equipados com uma cabine para o transporte do produto e obteve sucesso por fugir do congestionamento urbano onde os caminhões e outros veículos ligeiros se mostraram inadequados. Leonardi *et al.* (2012) demonstraram que o peso dos triciclos vazios é de 110 kg, possuem duas baterias, tem capacidade de carga útil de até 180 kg, espaço de carga de 1,5 m<sup>3</sup> e exigem uma recarga

noturna de quatro horas. Melo *et al.* (2014) comentaram que foram criados mais 272 quilômetros de ciclovias, possibilitando que 30 bicicletas elétricas “*Petite Reine*” melhorem a produtividade das operações de entrega, partindo de um centro de distribuição de 600 m<sup>2</sup> e economizando 660000 km de veículos a diesel. O sucesso fez o projeto ser estendido a outras cidades francesas, como Bordeaux, Lyon, Dijon e Rouen, e foram criados outros projetos semelhantes em importantes cidades europeias, como Genebra, na Suíça, Londres, na Inglaterra e Bruxelas, na Bélgica, nas quais as bicicletas são usadas em combinação com vans elétricas. Navarro *et al.* (2016) falaram que combinar o uso dos triciclos com terminais de transbordo para a entrega de encomendas e pequenas remessas vem se tornando cada vez mais comum na etapa de *last mile*, em jornadas de frequentes paradas para descarregamento das mercadorias. Juan *et al.* (2016) falaram que a grande maioria dessas entregas de remessas possuem prazo definido, o que torna obrigatório a inclusão das janelas de tempo de entrega aos clientes na roteirização. A Figura 5 mostra um triciclo “*Petite Reine*”.



Figura 5 - Triciclo utilizado no projeto “*La Petite Reine*”

Fonte: *laPetiteReine* (2019)

## 2.6 Análise dos modelos de VEs de carga no mercado

- Nissan e-NV 200 – Veículo comercial leve, equipado com uma bateria de 40kWh, a Nissan e-NV200 100% elétrica possui condução suave e grande eficiência. Possui bateria de íon de lítio, uma elevada autonomia de 301 km em condições urbanas e vários modos de recarga. O veículo e seus componentes elétricos estão cobertos durante 5 anos (100000 km) e a capacidade de bateria por 8 anos (160000 km). Possuem 3 formas de

recarga: aumento de 80% da carga ao recarregar entre 40 minutos a 1 hora, sendo a recarga rápida a forma mais fácil de abastecer e manter-se mais tempo na estrada. Basta dirigir-se à estação de serviço de autoestrada ou concessionária mais próxima. As outras formas adicionais de recarregá-lo são usar a *Wallbox* para obter uma recarga completa em 7h30 graças ao carregador integrado de taxa constante de potência de 6,6kW ou usar uma ficha doméstica e obter uma recarga completa em aproximadamente 21h30. Seu raio de giro é de 11,1 m, facilitando a entrada e saída em ruas estreitas. Possuem 4,2 m<sup>3</sup> de espaço de carga, massa de 1600 kg e carga útil máxima de 770 kg. Possui preço a partir de 29.880€ (NISSAN, 2018). Já realizou testes no Japão, Reino Unido, Cingapura, EUA e no Brasil, foi testado no Rio de Janeiro através da empresa FedEx, entregando encomendas. Será o segundo veículo elétrico a ser comercializado mundialmente pela Nissan, após o Nissan Leaf, este destinado ao transporte particular. Ainda não há previsão de sua chegada ao Brasil;

- Renault Kangoo Z. E. – Produzido na França, passou a ser comercializado na Europa em meados de 2017. Oferece uma autonomia de 270 km em condições amenas de temperatura e 200 km no verão. Pode ser recarregado de forma mais rápida, já que contam com um carregador com o dobro de potência, que permite uma recarga completa em 6 horas e no intervalo de 1 hora para almoço, podem ser recarregados 35 km, otimizando a jornada de trabalho. Serviços inteligentes de tecnologia da informação e comunicação como o Z. E. *Trip* e o Z. E. *Pass* permitem ao usuário localizar, verificar a disponibilidade, a compatibilidade do veículo e o preço da recarga, e então, se deslocar até a estação de recarga mais próxima, além de pagar quaisquer custos adicionais a taxas preferenciais e utilizar redes de recarga em toda a Europa e algumas de provedores que só estão disponíveis por assinatura (Groupe Renault, 2019).

### 3. APLICAÇÃO DE VEs POR TIPO DE SERVIÇO

Os diferentes tipos de serviço têm lógicas diferentes no uso dos veículos elétricos quanto à capacidade de carga e infraestrutura de recarga, conforme será demonstrado abaixo.

#### 3.1 Entregas urbanas

Conforme demonstrado por Nicolaidis *et al.* (2018b), as entregas urbanas consistem naquelas localizadas dentro dos limites de uma cidade, onde os veículos transportam as mercadorias dos centros urbanos de consolidação para lojas individuais ou dos centros de distribuição urbanos, como por exemplo supermercados, para lojas de conveniência urbanas, em caminhões semileves ou leves. Centros urbanos de consolidação são locais onde ocorre o transbordo de diferentes carregamentos na plataforma logística e após isto, são reunidos em um único carregamento a ser transportado por somente um caminhão, proporcionando maior ocupação do veículo, menores custos, consumo de energia e extração de matérias-primas, redução dos congestionamentos, das viagens, das distâncias percorridas, das emissões de poluentes atmosféricos, gases do efeito estufa e ruídos, podendo realizar entregas de diferentes fornecedores na mesma área, processo chamado consolidação da demanda. Moolenburgh *et al.* (2020) falaram que transportar essas cargas consolidadas em containers de forma organizada e padronizada reduz as atividades necessárias nos locais de descarregamento das mercadorias, o que também reduz os custos desta etapa.

Browne *et al.* (2005) *apud* Lebeau *et al.* (2013) definiram centro de distribuição urbano como uma instalação de logística que fica situada relativamente próxima à área geográfica que serve, seja um centro da cidade, uma cidade inteira ou um local específico, como um shopping, aeroporto, hospital ou grande canteiro de obras, a partir do qual as entregas consolidadas são realizadas naquela área. Os CDUs são vistos como uma solução para otimizar a sustentabilidade da logística das localidades onde estão, buscando as melhores soluções para o conjunto transportadoras, motoristas, fornecedores, autoridades e clientes; também atuam como suporte na coleta e distribuição de mercadorias na última milha da área urbana que servem e na cooperação entre operadores de logística de médias e grandes distâncias e capacidades de carga útil e os demais agentes do serviço.

Foltynski (2014) demonstrou que as principais operações de frete realizadas nos CDUs são a movimentação de carga; o recebimento, armazenagem e carregamento das mercadorias; e serviços de valor agregado. Cinco fatores definem sua qualidade de serviço: a equipe, com o número total de funcionários, suas programações e disponibilidades; a infraestrutura, com espaço suficiente para *cross-docking*, que consiste em um sistema de distribuição no qual a mercadoria não é armazenada, sendo enviada de forma imediata para o cliente, nas denominadas entregas expressas ou courier, e para operações de estoque; os veículos, seus tipos, capacidade, quantidade, disponibilidade e recursos necessários para operá-los; as características da demanda, como a frequência e tipos dos veículos que chegam aos CDUs, a quantidade de frete entregue e sua natureza (pequenos ou grandes volumes); e os custos de cada operação.

Quak *et al.* (2016a) falaram que os CDUs vêm sendo implantados juntamente aos veículos elétricos de carga, em um processo chamado consolidação da oferta. Fiori e Marzano (2018) explicaram que nos últimos anos, os CDUs estão sendo transferidos das metrópoles para outras cidades na mesma região metropolitana devido a mercados imobiliários mais baratos, maior disponibilidade de terras e menores congestionamentos, fenômeno denominado expansão logística. Para Moolenburgh *et al.* (2020), este processo vem ocorrendo porque está faltando espaço para realizar as atividades logísticas nas grandes metrópoles, devido à necessidade de acomodar o crescimento populacional. Como desvantagem desse processo, aumenta a quilometragem dos percursos, o que pode exigir maior número de paradas para recarga.

As jornadas são em sua maioria curtas, ocorrem principalmente nas principais vias urbanas e em suas operações por BEVs, tem suas baterias recarregadas em pontos de recarga sem fio nos momentos de carregamento das mercadorias, de descarregamento, quando houver instalações de recarga no estabelecimento, ou nos intervalos entre os turnos, o que aumenta a praticidade e possibilita o uso de baterias de menor capacidade. A instalação de equipamentos de recarga na área de descarregamento das mercadorias pode ser uma forma de abatimento no preço pago pelos clientes para receber o produto, devido ao serviço de recarga fornecido à transportadora. Essa forma de recarga tem apenas jornadas, que foram definidas por Wikström *et al.* (2015) como uma etapa na qual os veículos são recarregados em todas as paradas, diferentemente das viagens, nas quais ele é utilizado, mas quando estacionado, não é recarregado. Portanto, uma jornada pode conter várias viagens. Também há a possibilidade dos veículos serem recarregados durante o percurso, o que aceleraria a

operação, reduzindo o tempo de recarga no carregamento e descarregamento de mercadorias ou intervalos, aproveitando-se do fato de percorrerem rotas pré-determinadas onde há o sistema CoM (*Charge-on-the-move*).

Teoh *et al.* (2016) comentaram que na recarga durante o carregamento das mercadorias e intervalos, a capacidade mínima da bateria considera o uso máximo de energia de uma rota, enquanto para o descarregamento, a capacidade mínima da bateria considera o uso máximo de energia para viagens entre clientes em um sistema de distribuição. Nicolaidis *et al.* (2018a) disseram que a demanda adicional de energia para entregas urbanas depende de variáveis como o número de veículos que executam as entregas, o comprimento das rotas, a frequência das entregas etc. A potência de pico e a demanda de energia exigidas por caminhões elétricos de entrega urbana são bem superiores às necessárias para ônibus elétricos.

### 3.2 Entregas a domicílio

Consistem no transporte de mercadorias dos centros de distribuição locais e supermercados para os consumidores e são realizadas por veículos comerciais leves. Devido à maioria de suas viagens serem realizadas em curtas distâncias, com frequentes paradas e à possibilidade já existente da substituição de todos os veículos convencionais de capacidade até 3,5t por elétricos, é o serviço mais adequado para a utilização dos VEs, os quais os utilizados são aqueles com bateria com faixa elétrica disponível para o percurso solicitado, que devem manter uma margem mínima de segurança do SoC entre 20% e 30% (Nicolaidis *et al.*, 2018a). As empresas de logística utilizam a técnica CoSP (*Charge-on-the-Stop Points*) em pontos de recarga estática sem fio no depósito durante o período de carregamento dos caminhões, nos quais são totalmente recarregados, ou intervalos para almoço, e a recarga não pode ser demorada para que possam ser atendidas todas as entregas diárias, o que é facilitado por mais frequentemente possuírem baterias de menor capacidade. Dependendo da intensidade do uso, podem ter a necessidade de utilizar o sistema CoM para recarregar a bateria.

A demanda de energia necessária para essas operações permanece constante durante a madrugada até o início da manhã, horário do início do expediente, e nas últimas horas do dia, quando o expediente diário já foi encerrado, horários esses em que os veículos são recarregados no depósito. Essa energia é denominada carga base, pois se mantém constante durante os períodos (Huda *et al.*, 2018). Durante a realização das entregas, os veículos apresentam

flutuações diárias entre a margem mínima de segurança permitida para o SoC e a carga máxima obtida nos momentos de recarga durante o carregamento de mercadorias ou intervalos, quando ocorrem os picos de fornecimento de energia da rede juntamente aos períodos nos depósitos. Essa flutuação deve ser coberta pela geração de energia para atingir o equilíbrio necessário do sistema elétrico através de adequados aumento e redução na taxa de operação dos geradores, evitando assim problemas como baixa eficiência energética, altos custos operacionais e impactos ambientais negativos. A demanda de energia máxima necessária para a utilização do sistema CoSP não é a máxima fornecida pela rede, sobrando sempre uma margem para os veículos que utilizam o sistema OnC (*Overnight charging*) de recarga de energia, conforme demonstrado na Figura 6.

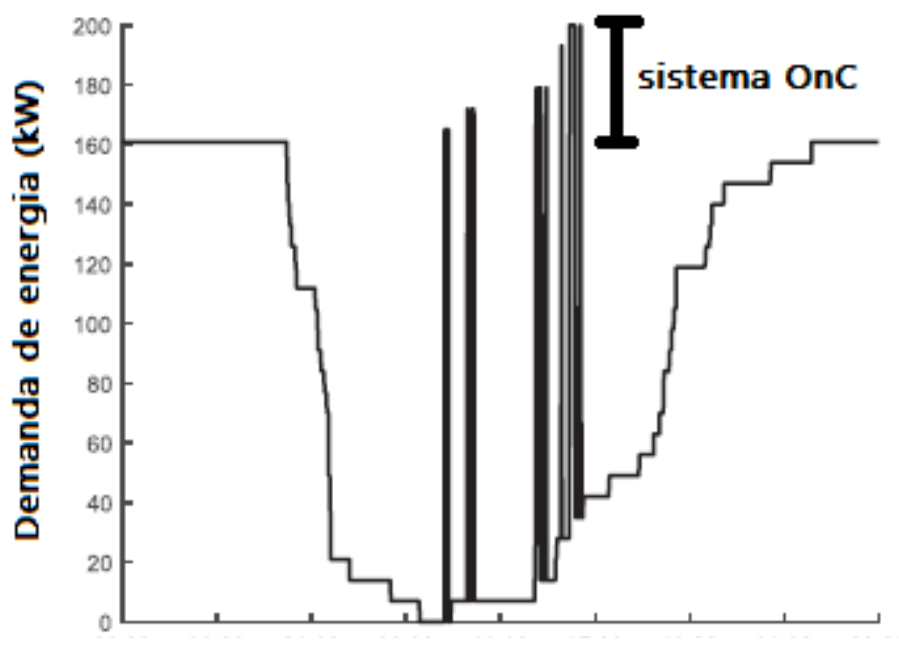


Figura 6 - Demanda de energia para entregas domiciliares

Fonte: Adaptado de Nicolaidis *et al.* (2018a)

Huda *et al.* (2018) explicaram que o sistema de transmissão de energia regula a frequência da rede elétrica, equilibrando a oferta e demanda em faixas de controle e tempo. Existem três classificações de regulação de frequência de energia, as reservas primárias, secundárias e terciárias. As primárias são baseadas no controle da capacidade de gerar energia para responder a um desequilíbrio repentino de curta duração, mas buscando minimizar a velocidade e o desvio da frequência para valores próximos aos de referência. As secundárias têm dois objetivos: liberar a reserva primária que foi ativada e restaurar quaisquer desequilíbrios nas interconexões. Realizam o controle de geradores térmicos e



baterias capazes de fornecer e absorver eletricidade no sistema de V2G em resposta a mudanças de frequência de apenas 5 a 10 minutos, ação essa que pode ser realizada de forma automática. Na regulação de frequência terciária, os geradores térmicos respondem ao sinal de transmissão numa faixa de 15 a 30 minutos, tempo maior que na regulação secundária, priorizando os pontos nos quais há maior necessidade de demanda de energia no momento.

Balm e Hogt (2017) disseram que o número de entregas a domicílio vem aumentando e, por consequência, o número de veículos comerciais leves nas cidades também está crescendo, o que coloca uma pressão crescente sobre a habitabilidade das cidades. Veículos compactos utilitários com mecanismo de acionamento ou auxílio elétrico e ciclomotores podem oferecer uma solução, pois ocupam menos espaço no trânsito e no momento de descarregamento das mercadorias; são mais simples de conduzir; podem manobrar com facilidade; os desempenhos de suas baterias, de menores capacidades, são melhor aproveitados; costumam ser projetados para fins específicos; e são uma alternativa à escassez de motoristas nas grandes cidades. Moolenburgh *et al.* (2020) explicaram que esses veículos compactos têm capacidade de carga útil entre 200 a 750 kg e são mais adequados para atividades de coleta de lixo e *catering*. Também demonstraram que os ciclomotores elétricos tem capacidade de carga útil de 100 a 599 kg e são ideais para entregas de alimentos volumosos e pequenas quantidades de materiais de construção e, além disso, são mais fáceis de manobrar que os veículos compactos e não é necessário esforço físico dos motoristas em sua condução, porém eles estão sujeitos a intempéries.

Leonardi *et al.* (2012) citaram como outro exemplo as bicicletas, que além da propulsão humana, que ajuda na recarga das baterias, vêm experimentando desenvolvimentos para a utilização no transporte de cargas, como maior leveza dos materiais de fabricação, criação de áreas para o carregamento e descarregamento das mercadorias e a implantação de motores elétricos que auxiliam o ciclista, principalmente, nas viagens em subidas, e reduzem sua fadiga pela condução mais confortável, sendo assim um sistema híbrido. Moolenburgh *et al.* (2020) demonstraram que suas principais vantagens são o fato dos ciclistas não necessitarem de carteira de habilitação; por percorrerem baixas distâncias, mais frequentemente não necessitam de uma recarga completa, o que aumenta sua flexibilidade operacional; são o único veículo a se deslocar pelas ciclovias, por isso não enfrentam congestionamentos, o que acelera as viagens realizadas e reduz os prazos das entregas; e por serem o tipo de VLCEs de menor tamanho, podem percorrer e manobrar além das estradas e ciclovias, também nas calça-

das e outras áreas exclusivas para pedestres para encontrar a rota mais rápida e/ou curta até o destino final, o que aumenta a segurança em sua utilização, porém regras padronizadas devem ser estabelecidas para seu adequado uso nessas áreas. Variam em carga útil de cerca de 25 kg para as convencionais de duas rodas com cesto ou bandeja a 350 kg para as de três ou quatro rodas com caixas, gaiolas ou trailers. São mais adequadas para a coleta e entrega de correspondências, encomendas, alimentos e pequenos volumes.

Tais veículos são denominados de veículos leves de carga elétrica (VLCE), são uma subdivisão dos veículos comerciais leves e sua utilização vem se expandindo entre prestadores de serviços logísticos nas cidades europeias, principalmente nas áreas centrais. Seu crescimento está diretamente atrelado ao aumento do número de trabalhadores autônomos; à possibilidade de pessoas de baixa renda entrarem no mercado de trabalho; às novas e crescentes tendências de entregas de supermercados, restaurantes, mercearias, lanchonetes *fast food*, farmácias, livrarias, lojas de roupas, e outras, após pedidos realizados pelos clientes em aplicativos de celular; à entrega de materiais de construção e a serviços de coleta de lixo.

O tamanho médio das remessas torna-se menor; são entregues com mais precisão dentro do tempo estipulado por serem mais rápidos em cidades congestionadas e por isso são adequados para entregas urgentes; são ideais para áreas urbanas movimentadas com espaço limitado e àquelas onde houver restrições de veículos maiores e/ou privilégios para VLCEs; reduzem o espaço vazio de quando as entregas eram realizadas por veículos comerciais leves maiores, aumentando o fator de carga, além de manter o nível operacional; reduzem os custos operacionais e de compra; podem estacionar com mais facilidade e proximidade ao endereço de entrega; possuem menores depreciação, consumo e custo de energia por quilômetro percorrido comparados a veículos maiores; são mais adequados em jornadas de serviço de baixas distâncias; e o tempo de atendimento ao cliente normalmente é curto. Devido a essas vantagens dos VLCEs serem mais perceptíveis nas bicicletas, um dos focos atuais é o aumento destas nas entregas a domicílio e um importante critério para avaliação do potencial dos VLCEs é a densidade da rede de clientes atendidos.

Para aumentar a eficiência na implantação dos VLCEs é necessário agrupar o máximo possível geograficamente as entregas, o que requer densidade de envios grande o suficiente ou distâncias curtas entre as paradas para entregas; e utilizar *softwares* avançados de sistemas de informações geográficas (SIG) para definir as melhores rotas para cada tipo de VLCEs.

Como limitações, por serem um mercado muito recente, os VLCEs ainda não possuem uma larga escala de produção e as especificações adequadas para cada segmento de carga (cargas a granel, vivas, frigoríficas, secas, fracionadas, completas, farmacêuticos, encomendas, expressas e carga geral) (Patrus Transportes Urgentes, 2017) ainda não foram definidas, o que limita o crescimento da demanda. Como exemplos, no mercado de alimentos, que vem apresentando número de entregas crescente, tanto para empresas (B2B-*business-to-business*) quanto para consumidores (B2C-*business-to-consumer*), não há ainda uma padronização em volumes, unidades de carga e sistemas de refrigeração. Esta última dificuldade é também enfrentada pelos frigoríficos, que têm dificuldades para esfriar e congelar. Os VLCEs têm um alcance limitado, de apenas 50 quilômetros; baixos valores de velocidade máxima e, por consequência, não são adequados para condução nas principais rodovias urbanas com altos índices de tráfego, para jornadas com longa distância até a primeira parada e para jornadas de longas distâncias.

A interação com o tráfego e a infraestrutura atual deve ser desenvolvida para afastar a insegurança dos condutores nesta nova tecnologia. Também deve-se buscar o projeto de VLCEs com maiores capacidades de carga por massa e volume, pois os atuais 750 kg estão muito abaixo das 3,5t dos veículos comerciais leves, o que aumenta em número considerável as viagens realizadas, o número de veículos utilizados, os congestionamentos e limita o tipo de mercadoria que podem transportar e as cadeias de suprimentos nas quais podem ser utilizados. O número de veículos necessários é obtido dividindo o tempo somado de todas as rotas de entrega, considerando ida e volta e o momento de descarregamento das mercadorias, pela duração do turno de trabalho, buscando a distribuição horária igualitária a todos os veículos da frota. Uma das soluções para estas barreiras é usar os VLCEs em conjunto com veículos comerciais leves maiores, com isso a redução de custos seria menor, porém, a capacidade de carga útil aumentaria, garantindo para os casos incertos que a demanda do cliente será atendida. Devem ser definidas nesta solução quais remessas iriam em cada tipo de veículo e quais as rotas ideais para cada um deles, baseadas nas diferentes capacidades de carga útil que possuem.

Melo e Baptista (2017) e Moolenburgh *et al.* (2020) disseram que alguns tomadores de decisão de empresas de transporte de mercadorias de pequeno porte optam por manter seus sistemas de transporte estabelecidos no passado e, com isso, ainda apresentam forte resistência a esta solução, mesmo com o aumento da variedade de modelos e desempenho dos VLCEs que vêm ocorren-

do, enquanto os administradores públicos demonstram um entusiasmo exagerado, e devem ser melhor dimensionados os impactos, a potencial participação de mercado e o escopo geográfico para que ambos os agentes compreendam melhor as virtudes e os pontos nos quais ainda é necessária uma melhora.

### 3.3 Longa distância (*Long-haul*)

Nicolaidis *et al.* (2018b) demonstraram que as entregas de longa distância (*Long-haul*) são aquelas responsáveis pelo transporte de mercadorias nacional entre centros de distribuição locais, regionais ou nacionais e centros de consolidação urbana, utilizando predominantemente as vias de trânsito rápido, com poucos quilômetros de estradas locais entre as principais rodovias e os pontos de entrega. A maioria das jornadas são realizadas em caminhões semipesados e pesados. Em um sistema de frete eletrificado, essas rotas teriam infraestrutura de CoM (*Charge-on-the-move*) ou CoS (*Charge-on-the-stop*), o que possibilitaria aos veículos necessitarem apenas de uma capacidade modesta de bateria para lidar com operações fora da rede e dentro dos depósitos, e percorrerem grande parte do percurso com o SoC constante ou crescente.

O sistema de recarga dinâmica CoM atua na infraestrutura rodoviária, transferindo energia sem fio para os veículos, enquanto eles estão em movimento, o que justifica a grande redução da capacidade da bateria instalada nos VEs, eliminando a “ansiedade de alcance”, reduzindo o custo, pois é gratuito, a massa e o tempo ocioso para paradas de recarga, que são algumas das principais barreiras para o uso generalizado de VEs. A “ansiedade de alcance” consiste na preocupação dos motoristas em conseguir realizar todo o percurso com a capacidade da bateria existente, o que pode fazer com que o processo de descarga acelere através de uma mudança no estilo de condução, com acelerações rápidas, altas velocidades e frenagens bruscas, e o percurso pode correr o risco de não ser concluído, daí a necessidade de um treinamento adequado para os condutores dos veículos elétricos e de outras medidas, como os aumentos da densidade energética e da autonomia das baterias, a difusão da infraestrutura de recarga e a redução do tempo desta atividade. Esse receio seria mais comum nos motoristas de frete urbano, pois costumam percorrer maiores quilometragens diárias e dirigem por mais horas ao decorrer de um dia útil. Devem ser instalados ao longo da faixa direita das rodovias porque, de acordo com o Código de Trânsito Brasileiro, os veículos de maior porte devem circular por estas ou por vias exclusivas quando houver.

Wikström *et al.* (2015) explicaram que alguns motoristas utilizam baterias

maiores e metade de suas capacidades como margem de segurança, mas não são necessariamente suas especificações técnicas que interferem na distância percorrida, e sim as condições operacionais nas quais o frete urbano é executado. Quak *et al.* (2016b) comentaram que os motoristas não estão preocupados com problemas de alcance caso haja uma rotina operacional com entregas diárias estáveis, que eles sabem que conseguirão realizá-las por completo com a capacidade da bateria instalada. Nesse serviço, os fatores operacionais são a distância, as rotas, a topografia das pistas, o tempo das jornadas, o número de paradas para recarga ou troca de baterias e para o descarregamento de mercadorias; o clima e a carga útil. Longas distâncias das entregas, realizadas em quantidades variáveis, com excesso de peso da carga ou em grandes períodos de tempo, e temperaturas extremas levam os condutores a sofrerem a “ansiedade de alcance”.

São instalados em locais pré-determinados ao longo das rotas de maior fluxo de tráfego, buscando uma distribuição geográfica igualitária por número e capacidade de carga, o que evitaria instalações de recarga de grandes capacidades em poucas localidades; afastados dos depósitos de carregamento, pois estão dentro do SoC esperado; e não são afetados por variações climáticas. Os veículos também podem ser recarregados em depósitos e pontos de entrega das cargas, e devido a manterem elevado seu SoC devido ao sistema CoM, não necessitariam de muito tempo de recarga, evitando que todos os caminhões tenham que ser recarregados simultaneamente e com isso, permitindo a compra de carregadores menos potentes, reduzindo os custos, que englobam também a conexão à rede e evitando aumentar significativamente o pico de carga, o que comprometeria a segurança do sistema de energia. Além disso, outro possível benefício proporcionado pelo sistema CoM é o aumento da vida útil das baterias de íon de lítio comparados a ciclos de carga e descarga profundos, mas ainda não há um consenso científico quanto a isto.

Este sistema está ligado à técnica IPT (*Inductive power transfer*), na qual há transferência de energia sem contato entre dois circuitos LC (indutor-capacitor) próximos, através de bobinas da unidade de carga da rodovia (primária) e do veículo (secundária), que geram um campo magnético circular que pode chegar a até 98% de eficiência na transferência de energia quando há um forte acoplamento entre elas. Quando não há a possibilidade de usar o magnetismo ou a distância entre os circuitos é grande (a partir de 10 mm), os circuitos devem ser ajustados a uma única frequência de ressonância para funcionarem, a fim de evitar perdas de energia e reduzir o risco de choque elétrico. O circuito primário

possui uma corrente alternada, que energiza a bobina, e o fluxo magnético é transmitido para o veículo produzindo uma fonte de corrente contínua para o motor elétrico e as baterias. Uma dificuldade que enfrentam é que os ímãs necessários ao sistema vêm de metais como o neodímio e o disprosio, elementos de terras raras, que apesar do nome, possuem relativa abundância no planeta, porém são considerados raros devido à dificuldade de sua separação, já que aparecem em minérios de composições distintas (Lira, 2011). Quanto menor a velocidade do veículo ou maior a duração das paradas ao passar sobre o sistema, maior a energia transferida, daí o sistema poder ser chamado de CoM ou CoS.

A potência de recarga instalada depende da demanda de veículos utilizando o sistema, da velocidade média de deslocamento, do total de quilômetros da pista eletrificados (Teoh *et al.*, 2016), do ciclo de condução dos veículos, do peso dos veículos elétricos, das distâncias entre as recargas e das especificações das baterias (capacidade das células, número de células em paralelo, número de módulos em série e SOC inicial) (Nicolaidis *et al.*, 2018b). Também apontaram como benefícios da técnica IPT a redução da frota de veículos de uma empresa, o que representa um significativo aumento na eficiência. A Figura 7 mostra a técnica IPT utilizada.

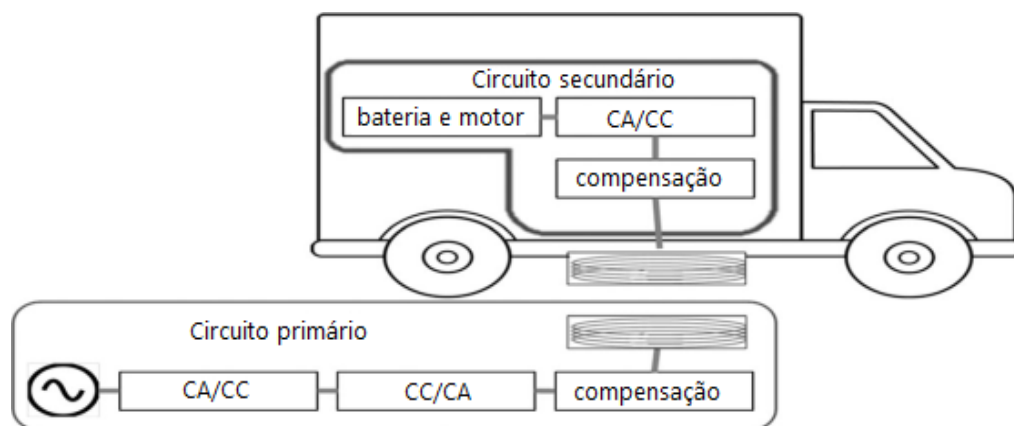


Figura 7 - Técnica IPT para entregas de longa distância

Fonte: Adaptado de Nicolaidis *et al.* (2018b)

A técnica IPT também ajuda nas dificuldades enfrentadas pelos *caminhões trolley* citadas anteriormente, mas também possui desvantagens em relação ao sistema de catenária em entregas de longas distâncias. Nicolaidis *et al.* (2018a) disseram que nenhum dispositivo IPT com taxa de potência de recarga acima de 100 kW está comercialmente disponível, valor significativamente menor do que a média de transferência de energia necessária para a aplicação no transporte rodoviário de cargas. A solução para este problema seria ter sob cada

caminhão vários dispositivos de coleta de energia elétrica, que passam por diversos transmissores CoM no percurso e cada um deles transferiria a energia para um dos receptores, possibilitando ao veículo ter a energia necessária para percorrer toda a estrada. Como fatores a melhorar, a instalação dos dispositivos de recarga exigiria a escavação de grande parte da rede de estradas existente, principalmente na chamada “pista lenta”, onde os veículos pesados viajam principalmente; deve ser duradoura e não causar excessiva rugosidade da superfície, o que seria uma dificuldade para pavimentos de asfalto, que são propensos a rachar em torno de dispositivos montados na superfície. Além disso, os altos campos magnéticos podem gerar problemas à saúde humana.

Acreditava-se ser muito improvável converter ou substituir os veículos de carga rodoviários a combustão interna destinados às longas distâncias em BEVs, devido ao alto consumo de energia, dificuldade para armazená-la, longos percursos, às implicações para a rede de fornecimento de eletricidade, altos tempos de recarga e à densidade energética insuficiente, o que tornaria muito caro o serviço, pela compra de baterias de alta autonomia ou para a implantação da infraestrutura de recarga necessária. Este problema seria resolvido com a utilização do sistema CoM, que aumentaria para mais classes de peso a atratividade e competitividade dos caminhões elétricos e reduziria o tamanho e a capacidade necessária das baterias.

### **3.4 Serviços auxiliares**

São serviços públicos como coleta de lixo e entrega de correspondências, nos quais mais frequentemente deve ser priorizado o uso do sistema CoS, devido ao número elevado de paradas durante as viagens de trabalho, o que reduziria significativamente a capacidade das baterias utilizadas.

#### **3.4.1 Coleta de lixo**

Os veículos de coleta de lixo são um caso diferente dos demais, pois além das jornadas, necessitam de energia também para os bin-levantadores, compactação do lixo, iluminação de segurança e outros sistemas. Possuem um ciclo de condução com muitas acelerações e desacelerações em curtos intervalos de tempo, beneficiados pela frenagem regenerativa. Um problema que enfrentam é que as estações de recarga podem ser afetadas por ambientes muitas vezes hostis das coletas de lixo e para isso, poderia-se utilizar a tecnologia CoS em locais-chave ao longo da rota (Nicolaidis *et al.*, 2018b), mantendo o veículo parado por um determinado tempo durante os processos de levantamento e compactação. O processo de compactação é fundamental, pois aumenta a ca-

pacidade de lixo transportado devido à diminuição do volume, porém origina ruídos muito altos prejudiciais à audição dos trabalhadores da coleta de lixo e é o serviço de maior consumo de energia dos caminhões.

Nicolaidides *et al.* (2018a) dividiram em cinco tipos a coleta de lixo: resíduos domésticos, resíduos comerciais, reciclagem a seco, reciclagem verde e entregas em caixas, e veículos diferentes são responsáveis por cada operação. Para os resíduos domésticos, a tecnologia OnC seria a mais adequada, já que os veículos não param tempo suficiente em qualquer local, onde um sistema CoS proporcionaria um grande aumento do SoC. Esta tecnologia consiste em quando os veículos são equipados com uma bateria com capacidade suficiente para suprir a energia necessária de todo o dia e são recarregados à noite e pela madrugada quando retornam ao depósito, assegurando que os caminhões estejam completamente recarregados ao início de cada turno da operação. Durante esse horário, a demanda de energia está baixa porque é o horário de menos utilização de eletricidade nas residências, o que beneficia o processo.

O período de recarga completa normalmente dura entre 4 a 8 horas, sendo um pouco menos da metade deste período destinado para limpeza e manutenção. Sua margem de segurança para o SoC é de 20%. Nesse sistema, a demanda de energia permanece constante em seu valor máximo durante a madrugada até o início da manhã, diminui gradualmente até zero, no qual fica por mais da metade do dia, e aumenta gradualmente ao final da noite até voltar ao máximo durante a madrugada, conforme mostra a Figura 8.

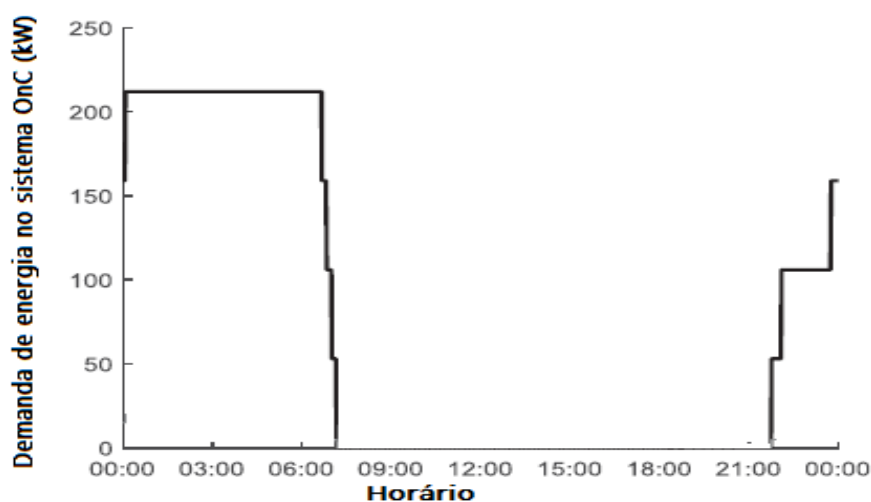


Figura 8 - Demanda de energia diária para o sistema OnC

Fonte: Adaptado de Nicolaidides *et al.* (2018a)

Como desvantagens deste sistema, não se beneficia dos menores preços



da energia elétrica gerada por fonte solar devido a ser realizado à noite, sua carga útil é muito menor em comparação a um veículo convencional devido ao elevado peso da bateria, o que aumenta o peso bruto dos veículos e pode afetar as operações de transporte de carga, que teria que ser dividida em um maior número de viagens ou haver o aumento do número de caminhões, o que leva a aumentos na demanda de energia necessária e no custo de capital. Testes vêm sendo realizados para possibilitar que os veículos que transportam este tipo de resíduo possam aumentar seus tempos nas paradas realizadas, podendo assim substituir o uso da tecnologia OnC pela CoS, o que proporcionaria que esses caminhões recebessem um aumento do SoC ao longo da rota e reduzissem o tamanho da bateria, sendo a opção de maior carga útil e mais atrativa financeiramente. A redução dos preços da eletricidade gerada a partir da fonte solar reduziria os custos operacionais e tornaria este sistema ainda mais viável. Uma dificuldade para implantar o sistema CoS é que os veículos destinados à coleta de lixo não possuem um cronograma definido de horários, o que poderia fazer com que vários precisassem utilizar o sistema simultaneamente, apesar da vantagem de normalmente esses veículos trafegarem pelas mesmas rotas.

Outra alternativa seria permitir que os caminhões sejam recarregados entre 5 a 10 minutos no depósito quando estiverem descarregando os resíduos domésticos antes do próximo turno, com a recarga dos veículos sendo realizada nos depósitos ao invés das paradas nos pontos pré-estabelecidos das rotas, assim utilizando-se do sistema CoSP. As vantagens dessa alternativa são que aumenta a praticidade para condutores e operadores logísticos e é mais barata em comparação com o sistema OnC devido ao uso de baterias menores, que compensa o custo adicional necessário para a implantação da infraestrutura de recarga na área de descarregamento dos resíduos (Nicolaidis *et al.*, 2018a). A desvantagem é que essas recargas rápidas podem prejudicar a bateria e reduzir sua vida útil. Tudo isso, assim como no sistema CoS, deve estar alinhado a um cronograma de horários detalhado das jornadas dos veículos destinados a tal tarefa.

Nicolaidis *et al.* (2018a) também comentaram que, para os resíduos comerciais e para a reciclagem a seco, a introdução de um CoSP na área de descarregamento dos veículos, em paradas de aproximadamente 5 a 10 minutos, é a melhor solução. Três pontos de recarga no depósito, para estes dois tipos de resíduos de lixo, mais os resíduos domésticos, proporcionariam um aumento de carga suficiente para os veículos. Os veículos de reciclagem verde podem executar todas as rotas sem recarga, que será realizada apenas à noite no depósito

através do sistema OnC, assim como as entregas em caixas.

A demanda de energia necessária para essas operações, nas quais o sistema CoSP é o mais recomendado, se apresenta de maneira semelhante às das entregas a domicílio, sendo a única diferença que os momentos de recarga dos veículos ocorrem durante o descarregamento dos veículos ao invés de acontecerem durante o carregamento dos caminhões. Onde o sistema OnC é o ideal, a energia apresenta maiores quedas por ficar menos tempo nos pontos de parada das rotas, porém, mantém um total de energia suficiente para a realização das operações devido à maior capacidade das baterias utilizadas.

Castro *et al.* (2013) discutiram sobre o biogás, produzido a partir do lodo através da digestão anaeróbia, que consiste na biodegradação de matéria orgânica através da ação de bactérias na ausência de oxigênio em biodigestores nas ETE (Estações de Tratamento de Esgoto). Antes de ser convertido em energia elétrica, o biogás deve passar por um processo de purificação, que consiste em remover os contaminantes e sua concentração de metano aumenta, passando a ser denominado biometano.

Quando utilizado para gerar energia elétrica, impede que o metano proveniente da decomposição da matéria orgânica seja liberado para a atmosfera ao se transformar em água e gás carbônico pelo processo de queima, o que é fundamental, pois o metano possui potencial poluidor 23 vezes maior que o CO<sub>2</sub>, que por sua vez, é retido pela fotossíntese da planta que originou o biogás. O excedente de energia produzido é injetado na rede de distribuição.

### 3.4.2 Entrega de correspondências

A atividade de entrega de correspondências, antes de ser propriamente realizada, passa pelas etapas de recebimento, classificação e postagem. Após sair do centro de distribuição, os carteiros realizam suas rotas planejadas de entrega caminhando, caso os destinos finais das correspondências sejam próximos ao CD, ou embarcam em um ônibus até o local de entrega, cada um com suas devidas bolsas de correspondências a serem entregues, ainda vazias.

Bandeira *et al.* (2019) comentaram que os carteiros entregam cerca de 50 kg por rota e os veículos leves de carga elétrica (VLCE) da empresa transportam e depositam o excesso de peso em um depósito móvel (DM) localizado próximo à área de entrega das correspondências, onde os trabalhadores carregam suas bolsas de trabalho, podendo os homens entregarem por vez 10 kg de correspondências e as mulheres 8 kg. Após entregarem todo o conteúdo de suas bolsas, voltam ao DM para que estas sejam novamente preenchidas com cartas.

Moolenburgh *et al.* (2020) falaram que instalações como os depósitos móveis devem ter escalas de trabalho o suficiente para serem utilizadas com frequência e assim compensar os custos extras de suas implementações.

VLCEs do tipo BEV já vêm sendo testados pelas empresas para proporcionar maior sustentabilidade em todos os níveis: econômico, social e ambiental, como por exemplo na estratégia que vem sendo experimentada da utilização de triciclos elétricos, na qual os carteiros poderiam entregar a totalidade das correspondências por rota em uma única viagem, sem a necessidade de repor as cartas nas bolsas, portanto dispensando a utilização dos veículos utilizados na forma anterior e do DM. Os carteiros já saem do centro de distribuição dirigindo os triciclos e apenas desembarcam deles para realizarem a entrega das correspondências aos destinatários. A Figura 9 demonstra como são os triciclos.



Figura 9 - Triciclos elétricos utilizados pelos Correios

Fonte: Correios (2014)

Nos testes já realizados, percebeu-se uma redução das emissões de poluentes atmosféricos e de GEE desde a saída das correspondências do CD até as rotas de entrega, considerando tanto o uso final quanto o ciclo de vida das emissões. Porém, algumas desvantagens também foram percebidas como, por exemplo o maior custo por entrega, devido ao maior valor de aquisição dos VLCEs do primeiro caso, o que não ocorreu com os triciclos, que apresentaram custo inferior por entrega e maior produtividade em comparação com os veículos a combustão. Bandeira *et al.* (2019) citaram como benefício social proveniente dos triciclos melhorias para a saúde dos funcionários, como a diminuição da frequência de seus batimentos cardíacos, que apresentavam-se mais acelerados.

## 4. PROPOSTAS

### 4.1 Viabilização da introdução de veículos elétricos no transporte de carga

Algumas soluções alternativas vêm sendo testadas para a introdução dos veículos elétricos no transporte de carga. Gomes *et al.* (2018) citaram o sistema de refrigeração de caminhões frigoríficos com módulos fotovoltaicos instalados nos tetos dos próprios, que, quando estes estiverem estacionados no pátio da empresa, irão se conectar a um inversor solar de tecnologia *on grid*, isto é, o inversor estará conectado à rede da concessionária local, injetando energia nesta, abatendo no consumo da unidade consumidora (empresa proprietária dos caminhões) ou gerando créditos para serem abatidos na próxima fatura, caso o consumo não ultrapasse a energia injetada na rede. O consumo de energia consiste, além do movimento do veículo, de seus componentes auxiliares e da refrigeração da caixa de carga. Se a energia elétrica gerada não for o suficiente, a rede elétrica compensa o que faltar.

Cada vez mais se busca a sustentabilidade mundial, e a área de transportes é a segunda maior poluidora do meio ambiente, sendo responsável por 32% das emissões de combustíveis fósseis no Brasil (Porchera *et al.*, 2016) e 24% no mundo (Zhao *et al.*, 2019), perdendo apenas para as indústrias no caso brasileiro, fato agravado pela predominância do modo rodoviário no transporte de passageiros e cargas talvez inadequada para um país de dimensões continentais, como o Brasil, e este modo é o maior produtor de poluentes do setor, mostrando total ineficiência do ponto de vista ambiental, além de ser aquele que mais consome energia por quantidade de carga transportada. Palencia *et al.* (2017) comentaram que o transporte rodoviário representa aproximadamente 75% das emissões globais de CO<sub>2</sub> e GEE do setor de transportes.

Atualmente, o setor de transportes responde por aproximadamente um quarto das emissões globais de gases de efeito estufa relacionadas à produção de energia, valores semelhantes aos europeus (Plötz *et al.*, 2019). Foltynski (2014) comentou que nas cidades europeias são emitidos 69% do CO<sub>2</sub> do continente, 70% dos poluentes e 40% das emissões de gases de efeito de estufa provenientes do transporte rodoviário europeu, e 75% da energia é consumida nas áreas urbanas.

O continente vem reduzindo suas emissões de poluentes atmosféricos nas últimas décadas, porém as concentrações ainda são muito altas e cerca de 90% dos habitantes urbanos estão expostos a seus perigos para a saúde. Fiori e Marzano (2018) falaram que 82,6% do consumo de energia no continente é proveniente do modo rodoviário. Kampker *et al.* (2018) afirmaram que na região da União Europeia, o transporte rodoviário é responsável por 23% das emissões de CO<sub>2</sub>, perdendo apenas para o setor energético, com 38%. Ferro *et al.* (2018) comentaram que o setor de transportes é responsável por aproximadamente 24,4% das emissões de GEE na região, o que comprova a predominância do CO<sub>2</sub> como gás do efeito estufa mais emitido e que o modo rodoviário emite a maior parte dos GEE dos transportes, com aproximadamente 73% do total, sendo 19% desse valor proveniente de caminhões semipesados e pesados dos 33% das emissões que os transportes de carga são responsáveis conforme demonstrado por Margaritis *et al.* (2016), que também mostraram previsões que dizem que o transporte de mercadorias aumentará cerca de 57% no período entre 2010 a 2050 e o setor de transportes se tornará a maior fonte de emissões de CO<sub>2</sub>.

Juan *et al.* (2016) e Lee *et al.* (2018) mostraram que nos EUA, o setor de transportes é responsável por 28% das emissões de GEE, e Yuksel e Michalek (2015) mostraram que são responsáveis por 32% do CO<sub>2</sub> emitido no país, a maior parte advinda de veículos leves, entre eles carros particulares, veículos utilitários esportivos e picapes; e em segundo lugar por caminhões médios, semipesados e pesados, que mesmo sendo uma pequena parcela dos veículos americanos, emitem 26% dos GEE dos transportes americanos e são os principais responsáveis pela emissão de poluentes como óxidos de nitrogênio e materiais particulados MP 2,5 e MP 10 (Gangloff *et al.*, 2017; Lee *et al.*, 2018). Um fator responsável por esta situação é que 70% do petróleo americano é consumido pelos transportes. Sen *et al.* (2017) falaram que outro motivo desta situação é que mais de 92% dos caminhões americanos atuais utilizam combustíveis fósseis e há uma previsão que o crescimento da economia local entre 2013 e 2040 está causando um aumento médio no consumo de diesel de 0,8% ao ano, com os caminhões sendo responsáveis por grande parte disso, o que leva ao aumento da necessidade de importar petróleo para a realização das atividades relacionadas aos transportes no país. Além disto, estes caminhões são os veículos, *on-road*, *off-road* ou, por modo, que vêm apresentando o maior crescimento na demanda de energia no país. Para a energia utilizada nos EUA, também demonstraram que os valores são próximos à proporção às emissões de GEE.

Liimatainen *et al.* (2019) comentaram que mundialmente, as emissões de

CO<sub>2</sub> dos transportes chegam a 9 trilhões de toneladas anuais e o transporte de carga é responsável por pouco menos da metade das emissões do setor, mesmo sendo uma pequena parcela dos veículos nas rodovias urbanas, entre 6 a 18% do total no mundo (Mirhedayatian e Yan, 2018), e aproximadamente 16% no Brasil (Sindipeças, 2019), e há uma tendência de crescimento entre 56% a 70% devido ao grande crescimento esperado na demanda, o que compromete os avanços obtidos na eficiência energética. Gangloff *et al.* (2017) disseram que a estimativa de aumento nas milhas percorridas por caminhões é de 80% em 2050 comparados aos níveis de 2010. Jaoua *et al.* (2019) e Ehrler *et al.* (2019) mostraram que os veículos de frete urbano percorrem um terço da quilometragem total dos transportes. Fiori e Marzano (2018) citaram que outro motivo que vem agravando essa situação é que os movimentos de frete nas áreas urbanas estão crescendo mais rapidamente que os de passageiros.

Foltynski (2014) falou que os transportes são responsáveis por cerca de metade do consumo mundial de petróleo, dos quais 40% são utilizados no transporte urbano e Palencia *et al.* (2017) apresentaram valores próximos para a energia utilizada, já que do total utilizado no setor de transportes, pouco menos da metade provém do transporte de cargas, e deste valor, mais da metade corresponde a derivados do diesel apenas para caminhões médios, semipesados e pesados, o que é mais um motivo para a urgência da introdução dos veículos elétricos no transporte de cargas. Nicolaidis *et al.* (2018b) falaram que acredita-se que o setor de transporte rodoviário de cargas é mais difícil de descarbonizar do que o transporte pessoal e este é outro motivo pelo qual a maioria das estratégias de descarbonização prevê que a proporção do total de emissões de gases do efeito estufa devido ao frete rodoviário aumentará significativamente no futuro. Concluem então que um progresso substancial em direção a um transporte mais sustentável requer uma contribuição significativa do setor de frete.

Melo *et al.* (2014) comentaram sobre as mudanças nos padrões de demanda, favorecendo entregas flexíveis como nas soluções *just-in-time* (JIT). O sistema de produção, JIT, apresenta inúmeras vantagens, como reduzir custos, evitar desperdícios, maior controle sobre todo o processo de fabricação e a maximização do fluxo de trabalho (Escola EDTI, 2018), mas também possui desvantagens, como o maior número de entregas realizadas pelos fornecedores para as lojas, o que leva à diminuição da mobilidade dos sistemas de frete urbano e passageiros devido à falta de aumento de capacidade das vias e estacionamentos e por consequência, diminuição da segurança viária, maior emissão de poluentes atmosféricos e gases do efeito estufa, menor eficiência do consu-

mo de combustível e maior número de viagens de retorno sem carga. Outro fator que leva ao agravamento dos congestionamentos são as frequentes paradas dos veículos de frete para descarregamento das mercadorias, o que contribui com a redução da capacidade das rodovias e se agravam quanto maiores forem o caminhão, a fila de espera e o tempo para as entregas. Chaud *et al.* (2012) propuseram como soluções a delimitação de zonas e a definição de janelas horárias de acesso para os veículos realizarem estas atividades nas vias, mas também propuseram que os destinatários ofereçam espaço para entregas sem a necessidade de realizá-las nas vias urbanas.

Como medidas diretamente relacionadas aos veículos, aumentar a eficiência dos motores (Gangloff *et al.*, 2017); diminuições na resistência e arrasto aerodinâmicos; melhor desempenho dos motoristas; maior capacidade de carga; frenagem regenerativa (Nicolaidis *et al.*, 2018a); padronização dos equipamentos, instalações e normas (Talebian *et al.*, 2018), já que diferentes *plugs*, tomadas e sistemas de pagamento complicam o processo de recarga, tornam a infraestrutura existente inviável para alguns usuários, limitam a adição de pontos de recargas e, assim, reduzem o desejo das organizações de comprarem caminhões elétricos para suas frotas (Wang e Thoben, 2017); menor resistência ao atrito do rolamento dos pneus e veículos mais leves (Nicolaidis *et al.*, 2018b). Como fatores operacionais, melhorias na eficiência logística e roteirização, buscando minimizar a distância percorrida, os tempos de entrega e condução, o consumo de energia e os custos, o que depende de informações das estações de recarga ou troca de bateria, como localização, potência, eficiência, custos, tamanho, disponibilidade, tempo de espera médio por faixa horária e horário de funcionamento, além do nível de carga ao chegar à estação, tempo de recarga, sua programação, número de veículos da frota, horário do turno de trabalho, carga útil transportada, alcance, velocidade, janela de tempo de atendimento aos clientes e redução das jornadas sem nenhuma carga. Adequados agendamento e roteirização aumentariam a frequência de entrega das mercadorias e reduziria as paradas em estações de recarga, melhorando a utilização dos veículos elétricos de frete urbano, principalmente hoje em dia onde a demanda JIT (*just-in-time*) é a mais utilizada. Todas essas medidas influenciam para a redução do consumo de eletricidade e visam obter o quinteto que define a eficiência logística: tempo, espaço, veículo, combustível e motorista (Teoh *et al.*, 2016).

Na área de mercado há limitações, como uma pequena quantidade e variedade de modelos de veículos, sobretudo de vans e caminhões maiores (Quak *et al.*, 2016a), já que até agora os veículos elétricos foram desenvolvidos

para soluções tecnológicas isoladas e não em um conceito geral de logística, salvo poucas exceções (Ehrler *et al.*, 2020). As montadoras devem receber incentivos para aumentarem e criarem novas produções em série neste ramo, proporcionando assim variadas opções de veículos capazes de satisfazer diferentes requisitos das empresas e alterarem as condições de condução, apesar que o advento dos VEs já levou algumas grandes fabricantes de veículos a investirem em suas vendas ou locações nos últimos anos e também ao surgimento de *startups* destinadas somente aos veículos elétricos. Outra dificuldade é o baixo número de oficinas para manutenção, reparos e trocas de peças, que são muito distintas em relação aos veículos convencionais, fato que ocorre devido a ser um produto ainda em sua fase inicial, pouco utilizado e ao baixo número de especialistas no ramo, poucos conhecem as especificações técnicas de VEs para corrigi-los.

Quando ocorrem problemas com os VEs, ainda há o risco considerável de não haver disponibilidade de peças e recursos para resolver de imediato os problemas técnicos dos veículos (Quak *et al.*, 2016b), podendo chegar a meses de reparo, o que limita a flexibilidade das empresas. O motivo é que muitos fabricantes ainda não oferecem suporte eficiente nas necessidades quando comparados ao suporte rápido das montadoras de veículos convencionais, além de apresentarem alto custo quando for necessário o reparo, o que pode fazer com que muitos motoristas se decepcionem com a nova tecnologia e se desmotivem para continuarem conduzindo VEs (Quak *et al.*, 2016a), reduzindo sua competitividade no mercado.

Como diminuir os tempos de recarga, que tem como uma de suas melhores alternativas ser feita diretamente à rede elétrica, é um resultado que se deseja alcançar e investimentos e adaptações na infraestrutura são necessários para isto, podendo também os veículos fornecer energia ao *grid* elétrico em horários de pico e realizar a recarga em horários de baixa demanda, utilizando o serviço auxiliar denominado *Vehicle-to-grid* (V2G), no qual são conectados a carregadores bidirecionais, as baterias absorvem o excesso de produção de eletricidade e o devolve ao sistema em períodos de picos de carga, estabilizando a rede elétrica e fornecendo eletricidade de reserva (Ferro *et al.*, 2018), e assim obtém custos mais baixos de recarga através de tarifas comerciais, reduz a pressão sobre a rede elétrica decorrente da recarga simultânea dos veículos, permite aos proprietários dos veículos vender o excedente de energia e reduz a quantidade de baterias estacionárias necessárias em sistemas de produção das energias eólica e fotovoltaica, podendo este processo levar a grandes reduções de emissões de



GEE pois não seria necessária uma maior produção de eletricidade (Hoekstra, 2019), e também fornece para a rede elétrica serviços importantes como regulações de frequência e tensão, que devem começar a ser medidas antes da introdução do V2G para definir seus valores regulados; e reserva de energia, para atender rapidamente a picos repentinos na demanda ou quedas no fornecimento. Como desvantagem desse processo, alguns estudos argumentam que pode reduzir a vida útil das baterias (BBC, 2018).

Para regularizar esse processo, é realizada a assinatura de um contrato entre os proprietários dos VEs e uma empresa, responsável por controlar o tempo e a potência da recarga dos veículos e do fornecimento de energia para o sistema. Além disso, essa empresa se comunica com o sistema de transmissão da energia elétrica e com o mercado de eletricidade para participar de licitações dos sistemas de V2G disponíveis (Huda *et al.*, 2018). Também é necessário propor soluções para aumentar o tempo de autonomia, que corresponde a quantos quilômetros o veículo pode percorrer com a energia máxima contida na bateria, e a velocidade máxima, proporcionando deslocamentos mais rápidos de passageiros e cargas.

Apesar de não emitirem quaisquer poluentes e GEE durante o seu uso e ter a mesma possibilidade durante a produção de eletricidade se forem utilizadas fontes renováveis, os veículos elétricos ainda emitem gases do efeito estufa em sua etapa de produção. A produção de baterias gera em média cerca de 65 kg de GEE para cada kWh produzido, levando em consideração todos os países e diferentes químicas. Um veículo com uma bateria de 100 kWh, por exemplo, emitiu 6,5 toneladas de GEE durante seu processo de produção. Outro problema ainda mais grave que apresentam é que os processos de extração e refino de elementos como o lítio e o cobalto, principais componentes das baterias, emitem uma considerável quantidade de GEE, que podem variar entre 48 a 216 kg/kWh. Além disso, um carro elétrico necessita de menor peso e para isso, utilizam muitos metais de alto desempenho como o alumínio e o cobre na sua composição, além de metais de terra rara sobretudo nos ímãs que estão por todo o veículo, principalmente no motor, o que leva a uma emissão de cerca de 8 toneladas de CO<sub>2</sub> para a produção de suas partes excetuando as baterias (Reparação Automotiva, 2018; Hoekstra, 2019), valores ainda maiores no caso dos caminhões. Os componentes eletrônicos dos VEs e as baterias também possuem um alto consumo de energia na etapa de produção, que é compensado na sua fase de uso. Expandir a economia circular dos elementos dos VEs e avançar na tecnologia para baterias são soluções para isso, e se deve mostrar como devem ser

realizadas.

Na área do transporte de carga, os caminhões ainda apresentam dificuldades de realizar a etapa de rede de suprimentos, que corresponde à chegada de matérias-primas e componentes nos fabricantes principais e soluções para esta situação devem ser obtidas. Outra dificuldade que enfrentam é que em temperaturas extremas, como no verão ou no inverno, ou em condições climáticas variáveis, como as chuvas, as condições do ar como um componente dos acessórios dos veículos, principalmente das baterias, consomem uma quantidade de eletricidade e reduzem massivamente o alcance de condução. Ehrler *et al.* (2020) citaram que limpadores e sistemas de ar condicionado se enquadram nesta situação, sendo o segundo o equipamento auxiliar de maior consumo de energia em muitos veículos. Resumidamente, os problemas que ainda impedem a substituição em grande número dos veículos convencionais pelos elétricos no transporte de cargas são a maturidade tecnológica insuficiente e o caso comercial ainda não comprovadamente viável.

Steward *et al.* (2019) afirmam que, em virtude das diferenças de legislação existentes entre os países, a Europa pretende unificar alguns dos principais incentivos e benefícios fiscais para que algumas das principais economias do setor possam promover, de forma mais gradual e contínua, mudanças na fabricação de veículos tradicionais a combustão interna para veículos elétricos, com perspectivas de implementar esses novos incentivos unificados a partir de 2026 nos principais países do continente.

No caso brasileiro, Reis (2019) afirma que, em virtude do distanciamento do governo brasileiro da promoção de novos incentivos fiscais e benefícios que deram resultados positivos em outros mercados e da falta de perspectiva de importação e adaptação de algumas das principais políticas públicas já implementadas no setor em âmbito internacional, as projeções mais otimistas apontam que somente a partir de 2035, no caso brasileiro, as mudanças na fabricação de veículos convencionais a combustão interna para veículos elétricos poderiam ocorrer de forma contínua.

Outra alternativa que vem sendo proposta, já que a implantação majoritária dos veículos elétricos no transporte de carga não será imediata, é que os percursos de entregas sejam realizados parte por caminhões pesados a combustão interna e no início de outra cidade dentro da mesma região metropolitana, a carga seja colocada em uma plataforma de um terminal de transbordo onde é descarregada e então é distribuída em veículos comerciais leves ou caminhões elétricos menores para prosseguir a viagem, mas a carga útil deve ser

bem escolhida, permitindo a racionalização e o agrupamento das entregas. Isso ocorre porque o elevado número de veículos elétricos na operação provocaria um grande aumento nos custos totais de propriedade e nos congestionamentos, sobretudo no horário de pico, o que representaria um custo muito alto para reduzir as emissões de poluentes e GEE. Este processo é denominado desconsolidação de carga e ocorre de forma oposta na viagem de retorno. Como os percursos de ida e volta são opostos, mas com ambos passando pelo terminal, o fator de carga aumenta e a taxa de retorno sem carga diminui para os caminhões elétricos e veículos comerciais leves. Rizet e Hoai-Thu (2019) comentaram que neste projeto na França, os caminhões a combustão interna só são permitidos se transportarem uma remessa a partir de 20 toneladas e trafegarem majoritariamente nas vias de trânsito rápido, evitando uma divisão desta carga em menores caminhões, o que levaria a maiores congestionamentos e emissões de poluentes.

Juan *et al.* (2016) sugeriram a implantação de frotas mistas como possibilidade, já que a introdução completa dos VEs no transporte de carga não será imediata, analisando as características específicas a cada tipo de veículo como, por exemplo, a diferente autonomia e a possível necessidade de recarga para os VEs no percurso. Devido ao maior custo de aquisição dos VEs, é necessário que se tenha orçamento suficiente para renovar a frota. Os primeiros passos para essa implantação são determinar a composição ideal da frota heterogênea com o número, tamanho e tipo de VEs a serem comprados. Nesse sistema, os tomadores de decisão devem avaliar se os custos do TCO (investimentos, operacionais e de propriedade) serão computados por tipo de veículo ou agrupados e tentar a melhor composição possível dos veículos para reduzi-los. Devem encontrar também uma composição que minimize as emissões de GEE, poluentes e ruídos durante as entregas, combinada com uma adequada roteirização.

Uma etapa do transporte de mercadorias que vem sendo muito difundida ao longo desses últimos anos é a *last mile* (última milha). Quando uma compra é realizada virtualmente, no chamado *e-commerce*, o processo logístico da entrega do pedido é longo até chegar ao consumidor. A etapa de *last mile* consiste no transporte da mercadoria do centro de distribuição até o seu destino final, seja o cliente B2B ou B2C (Ehrler *et al.*, 2019). Juan *et al.* (2016) disseram que é a etapa onde o processo de distribuição é mais crítico, pois nela estão contidas a maioria das mais importantes decisões operacionais a serem tomadas, como a roteirização, e o contato com o cliente final une as atividades de transporte, logística e marketing. Moolenburgh *et al.* (2020) comentaram que a análise da efi-

ciência energética, custos, sustentabilidade e satisfação dos clientes na etapa de *last mile* é essencial para verificar a qualidade alcançada na entrega dos pedidos. Ehrler *et al.* (2019) explicaram que os maiores agentes de vendas on-line são os varejistas tradicionais, que se inseriram nesse mercado para expandirem seus lucros e se manterem atualizados às novas tendências, mas há um crescente número de *startups* entrando nesse negócio também. Lebeau *et al.* (2013) falaram que estas entregas vêm sendo transferidas de caminhões para veículos menores, permitindo sua racionalização. Foltynski (2014) comentou que as vantagens dos veículos elétricos são ainda mais acentuadas em formas mais eficientes de entrega de mercadorias nas últimas milhas dos centros das cidades, onde normalmente se localizam um grande número de atividades comerciais.

Uma ação que os fornecedores podem tomar para reduzir os custos operacionais seria a terceirização dos serviços, para transportadoras ou trabalhadores autônomos. Os custos operacionais, de investimento, propriedade e de segunda mão, que compõem o custo total de propriedade, tornariam-se desnecessários, além de haver uma grande diversidade de opções a escolher para a realização do serviço, o que possibilitaria reduzir os preços pagos pelos remetentes para realizarem as entregas. Como desvantagens, há as incertezas no valor do frete e a dificuldade em controlar a qualidade do serviço executado, que é facilitada quando o serviço é feito por conta própria.

Chaud *et al.* (2012) comentaram sobre a possibilidade de realizar entregas noturnas, que são beneficiadas pelo fato dos VEs emitirem ruídos quase imperceptíveis, horário no qual dificilmente enfrentam congestionamentos e, conseqüentemente, há uma redução no número de acidentes e maior número de entregas realizadas, o que cobre os custos de investimento e permite a redução no valor do frete. Como desvantagens desse procedimento, haverá acréscimos nos encargos trabalhistas devido à necessidade de pagamento de adicional noturno e disponibilidade de pessoal para recebimento das mercadorias, o que pode ser resolvido através de um contrato que permita ao fornecedor o acesso livre às instalações.

Outra ação fundamental para obter sucesso no negócio é garantir o bom desempenho do giro de estoque, o que é ajudado pelo sistema de produção JIT, que mantém o equilíbrio entre as vendas realizadas e as compras de mercadorias. Quando o nível de compra é baixo e o produto não está à disposição do cliente, as vendas são prejudicadas e gera-se uma situação de urgência, na qual a empresa perde oportunidades de negociações e precisa comprar e vender com valores mais elevados do que se tivesse mais tempo para negociar. Quando

ocorre o inverso e o volume de compras é maior do que o de vendas, os estoques ficam lotados e há perdas por vencimento, produtos sem saída, capital de giro estagnado, aumento de custos fixos da empresa, entre outros prejuízos (Quickbooks, 2016).

Giro de estoque é o parâmetro responsável por demonstrar o desempenho de um estoque, indicando de forma padronizada sua qualidade em relação à utilização de recursos estocados. Esse indicador é aplicável para qualquer tipo de estoque, independentemente de seu tamanho ou complexidade. É calculado dividindo o total de vendas anuais pela quantidade média de um estoque ou quando diferentes produtos são vendidos, esse cálculo é realizado com base nos preços. Permite saber de forma precisa em quanto tempo o estoque precisa ser renovado e é fundamental para a gestão financeira das empresas, ajudando-as a se programar para períodos futuros. No frete urbano, é usado para os veículos além das mercadorias, verificando um dos itens que mede a qualidade dos CDUs, em seus valores de capacidade, que podem variar dentro de uma mesma frota, quantidade e disponibilidade, e possibilitando o cálculo de estimativas de redução de consumo de energia e de emissões de poluentes atmosféricos e GEE.

Porchera *et al.* (2016) comentaram que a introdução dos veículos elétricos é um novo mercado com potencial de crescimento, de geração de empregos e podem possibilitar o desenvolvimento de parcerias estratégicas entre empresas nacionais e estrangeiras. Porém, por ser uma tecnologia ainda em seu estágio inicial, enfrentam alguns riscos, sendo eles as incertezas quanto à tecnologia a ser adotada, a adaptação dos conceitos de logística para a introdução dos VEs, a crise econômica dos últimos anos, o baixo poder de compra da população no Brasil, o regulamento pouco claro sobre a certificação do fornecimento de eletricidade, a variação dos preços da eletricidade e do petróleo, que tem um forte impacto sobre o TCO nos custos operacionais, e outras fontes de energia com potencial de crescimento. Para a situação brasileira, devido ao limitado poder aquisitivo da maior parte da população, os recursos investidos nos veículos elétricos destinados aos transportes coletivo e de cargas são mais eficazes que nos veículos particulares, pois são administrados por empresas do ramo.

#### **4.2 Solução das barreiras aos veículos elétricos**

As barreiras enfrentadas para viabilização dos veículos elétricos no frete urbano são inúmeras e as soluções devem ser tomadas de forma integrada para alcançar o objetivo desejado, juntamente com um plano de transição dos veícu-

los convencionais para os elétricos.

#### 4.2.1 Recarga dos veículos elétricos

Uma das barreiras que os veículos elétricos ainda enfrentam para seu crescimento no mercado é o seu alto tempo de recarga, chegando algumas a 8 horas, o que leva a preocupações quanto ao prazo de entrega das mercadorias devido ao uso ineficiente do tempo dos motoristas (Porchera *et al.*, 2016). Várias soluções vêm sendo testadas, entre elas a presença em *shopping centers* de pequenas termoelétricas de alta eficiência que produzem tanto eletricidade como vapor para ser utilizado no sistema de ar condicionado do edifício, e estes equipamentos poderiam durante o final da noite e a madrugada recarregar uma frota de veículos elétricos, conforme demonstraram Pessanha *et al.* (2011). Tal fato ocorre por ser um local de movimento diário, com frequentes paradas e ausência de público durante a madrugada, período em que poderiam ser realizadas as recargas, o que ainda é facilitado pelos veículos de entrega que não percorrem a autonomia total das baterias durante o dia. Parte dessa energia restante pode ser usada pelos VEs para auxiliar a rede elétrica através do sistema V2G. Devem obter energia e oferecer o serviço com preços abaixo das tarifas das distribuidoras para serem bem-sucedidos nesta concorrência. Esta recarga assegura que o veículo estará totalmente recarregado ao início de cada turno de trabalho.

Outra solução quanto às recargas dos veículos seria investir em melhorias na infraestrutura das redes elétricas para suprir a demanda necessária, como por exemplo, a implantação de estações de recarga rápida ao longo das estradas, e também deve ser aumentada a autonomia das baterias, pois continua sendo um entrave para a aceitação desse tipo de força motriz no transporte. Nicolaidis *et al.* (2018a) afirmaram que os custos para a implantação da infraestrutura de recarga são comparáveis a outros projetos de infraestrutura urbana, não apresentando custo tão elevado quanto o esperado. Caso a demanda esteja alta e seja viável, pode-se tentar o aumento da margem de reserva de energia elétrica acima do crescimento econômico, beneficiado pelos custos menores que a expectativa. Estes custos estão divididos em equipamentos, instalações e conexão à rede. Mas para Iwan *et al.* (2019), os países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, precisam, além destes investimentos específicos para os VEs, desenvolver simultaneamente uma rede de estradas, estacionamentos, oficinas de reparo e outros elementos essenciais. Feng e Figliozzi (2012) falaram que as áreas urbanas são mais adequadas para a adoção inicial de veículos elétricos devido à maior densidade potencial de estações de recarga, que devem ser ana-

lisadas dentro da estrutura logística das cidades. Ehrler *et al.* (2020) sugeriram como alternativa a extensão da janela de tempo das estações de recarga. Iwan *et al.* (2014) comentaram que essas melhorias são um pré-requisito essencial, que, mesmo com a diminuição dos custos de compra e os menores custos operacionais, sem elas não haverá o aumento do interesse pela adoção massiva de caminhões elétricos em áreas urbanas.

Uma alternativa que vem sendo estudada é realizar a recarga parcial dos veículos após o início com carga completa, o que aumenta a flexibilidade logística para diversas operações. Ferro *et al.* (2018) estipularam como limite máximo do SoC 80% da capacidade da bateria, a fim de aumentar seu tempo de vida útil, já que a reduz a profundidade de descarga e mantém os veículos menos tempo em carregadores mais rápidos e potentes, que podem reduzir sua vida útil. A recarga parcial é de grande utilidade no uso de carregadores de nível 3, pois consegue elevar o SoC e o alcance em poucos minutos de recarga, reduz os custos caso houvesse uma recarga completa, já que estes carregadores apresentam preços mais altos para recarregarem os veículos e é a ideal para a recarga dos veículos durante um processo de entrega de mercadorias pela sua rápida duração.

Juan *et al.* (2016) falaram que nos investimentos para a implantação das estações de recarga quatro fatores devem ser levados em conta: o número, o tipo de estações de recarga a serem criadas, a localização destas e suas capacidades de energia. Teoh *et al.* (2016) explicaram que a questão não é apenas qual o tipo e quantos carregadores instalar, mas quando e onde devem ser usados, o que é identificado através da compreensão da programação diária de condução dos motoristas e do avanço da tecnologia que cria novas instalações de recarga adequadas a cada oportunidade.

#### **4.2.1.1 Tipos e capacidade das estações de recarga**

O tamanho e a capacidade das estações de recarga afetam o planejamento de transportes. Normalmente, a capacidade dessas estações é limitada, o que limita também o número de veículos que podem ser recarregados simultaneamente. Ferro *et al.* (2018) falaram que a recarga simultânea de muitos VEs sem controle pode causar problemas técnicos na rede elétrica devido à sobrecarga a que seria exposta, bem como aumentar a diferença entre as cargas de pico e as mais baixas, agravados pelos longos tempos de recarga. Podem ser divididas em dois tipos: recarga rápida ou lenta. O preço da recarga varia de acordo com o nível do carregador e também pode variar conforme o horário. Os

carregadores de nível 1 são aqueles em que o carregador portátil que vem incluído ao veículo tem uma extremidade conectada a uma tomada padrão de 120 V e outra ao veículo, e pode realizar uma recarga completa em 8 a 12 horas, utilizando corrente alternada, reduzindo o tempo do processo de acordo com a tecnologia da bateria embutida. Não necessitam de nenhum equipamento adicional e geralmente oferecem de 4 a 5 quilômetros de alcance por hora de recarga. A Figura 10 mostra um modelo de carregador de nível 1.



Figura 10 - Exemplo de carregador de nível 1

Fonte: CPFL Energia (2019)

Os carregadores de nível 2 são vendidos separadamente dos veículos, mas frequentemente são comprados simultaneamente. São utilizados um plugue de corrente alternada de 240 V para uso residencial, o que permite executar uma recarga completa em 2 a 6 horas, dependendo da eficiência do veículo, do carregador e da tecnologia da bateria embutida. Para uso comercial, o plugue é de 208V. Não podem ser conectados às tomadas padrão e por isso, geralmente necessitam ser instalados por um eletricista em residências, estações públicas de recarga, depósitos e ambientes comerciais, como por exemplo, com a utilização do sistema OnC em shoppings, que utiliza um circuito exclusivo de 40A, e também podem ser utilizados como parte de um sistema de painéis solares. São compatíveis com todos os BEVs e híbridos *plug-in*.

Os carregadores de nível 3, conhecidos como CHAdeMO (*Charge de move*) ou carregadores rápidos por corrente contínua (*DC Fast Chargers*), são recarregados através de uma tomada de 480V. A maioria deles fornecem uma recarga de 80% em 30 minutos (EVTown, 2015), de 100 a 160 quilômetros de alcance em apenas 20 minutos de recarga, porém ainda não são compatíveis com todos os veículos, principalmente para os híbridos *plug-in* (EnergySage, 2019), podem reduzir a vida útil das baterias e não existe um padrão da indústria para esse nível de recarga já que requerem equipamentos altamente especializados e alta potência para instalar e manter, apesar que nos EUA já estão sendo



implantados em ambientes públicos, industriais e comerciais. Junto com o sistema CoM, as recargas rápidas são essenciais para as operações de longas distâncias sem que haja a necessidade do aumento da capacidade e tamanho das baterias.

Juan *et al.* (2016) mostraram que outra possibilidade além da recarga é um sistema de remoção da bateria sempre que estiver quase totalmente descarregada e substituí-la por outra totalmente carregada, método denominado troca de bateria. A disponibilidade de baterias totalmente carregadas depende do tamanho da estação, do total de carregadores e da demanda pelas baterias e carregadores que a estação apresenta. Sua principal vantagem é a velocidade, a operação pode levar menos de 10 minutos, tempo próximo ao reabastecimento dos veículos convencionais e ainda mais rápidos que as estações de recarga nível 3, além de que não apenas melhora a produtividade dos veículos, que são modelados para ter o alcance duplicado, mas também reduz o custo comparado à recarga. Margaritis *et al.* (2016) demonstraram que a operação automatizada pode levar apenas de 3 a 5 minutos. Esses fatores, junto ao suprimento extra de energia da rede e a confiabilidade das estações maximizam o valor deste projeto.

As características das estações de troca de bateria são as seguintes: as baterias quase ou totalmente descarregadas deixadas no local são recarregadas durante a noite quando o custo do serviço é menor; prestação de serviço de suporte à rede de maneira centralizada de carga e descarga; as viagens para os motoristas são facilitadas pois começam o percurso com uma bateria com sua carga máxima; a recarga das baterias é feita lentamente para prolongar sua vida útil; e a economia nos custos operacionais dos VEs, já que no momento da compra do veículo se adquire um plano junto à montadora, permitindo que a troca da bateria seja ilimitada. Esta é realizada em postos autorizados e como dificuldades, ainda existem em pequeno número, o que limita a participação desse serviço no mercado, além da falta de um padrão de bateria unificado para os diferentes tipos de VEs. Outra possibilidade é que as empresas de logística insiram a troca de bateria em seus modelos de negócios de propriedade, estabelecendo e operando as estações sozinhas.

#### **4.2.1.2 Localização das estações de recarga**

A localização das estações de recarga ou troca de bateria deve estar atrelada a reduzir o número e custos das jornadas, propiciando um número adequado de viagens, e objetiva apresentar distâncias bem distribuídas entre de-

mandas, capacidades e número de instalações, levando em consideração o tempo de deslocamento entre as instalações e a limitada autonomia dos VEs, sendo assim um fator fundamental para o nível de serviço e custos operacionais das empresas de logística. Juan *et al.* (2016) falaram que podem ser baseadas em vértices ou nos fluxos de veículos, dependendo das análises realizadas sobre a demanda de recarga, nas quais predominam a localização pelos fluxos, nos quais devem ser pesquisados seus principais locais de origem e destino. Se não houver estações de recarga nos pontos de origem, deve haver ao menos uma na metade das rotas de fluxo até o destino para garantir que o percurso possa ser concluído.

Iwan *et al.* (2014) demonstraram que existem quatro estratégias de recarga levando em consideração o local da fonte de alimentação: recarga na residência, no local de trabalho, em espaços públicos urbanos e nas rotas das viagens, o que aumenta a flexibilidade do serviço. Algumas podem ser instaladas simplesmente conectando o carregador a uma tomada comum, outras requerem uma instalação personalizada. A recarga doméstica é responsável por 80% do serviço em BEVs ou híbridos *plug-in* contando com os veículos particulares (ChargeHub, 2020). Nesse processo são mais comuns as recargas de níveis 1 ou 2 utilizando o sistema OnC (*Overnight charging*). Teoh *et al.* (2016) propuseram como solução o uso de carregadores que possam ser compartilhados entre dois veículos da frota no depósito durante o horário de almoço, que é de uma hora diária, ou entre os trabalhos, sendo esta mais uma estratégia que leva à possibilidade da utilização de baterias de menores capacidades.

Juan *et al.* (2016) demonstraram como deve ser determinada a localização das estações de reabastecimento de hidrogênio para aproveitar melhor suas vantagens de tempo de recarga e autonomia próximas às dos veículos convencionais. São instaladas próximas a áreas com alto volume de tráfego; onde possa ser fornecido combustível para viagens de longa distância; em locais mais frequentados para aumentar a conscientização do público; e acessíveis a motoristas que estão conduzindo seus primeiros FCEVs. Podem se basear na infraestrutura dos postos de gasolina para estimar o número e locais adequados à sua instalação, utilizando sistemas de informações geográficas (SIG) para mapear as localidades.

#### 4.2.2 Custos de aquisição

Quanto aos altos custos de aquisição, deve-se aumentar os incentivos em pesquisas no que tange à produção de baterias mais baratas, elemento mais

caro dos veículos, o que impactaria diretamente na redução dos preços dos veículos elétricos de carga e consequentemente, aumentariam sua competitividade no mercado. Muitos líderes de frota ainda não utilizam VEs devido ao seu alto valor de aquisição, apesar do segmento e da demanda de carga que entregam e operações que realizam serem adequados à esta tecnologia. Juan *et al.* (2016) disseram que nas áreas rurais, os veículos híbridos são mais utilizados, mas os BEVs vêm se tornando uma alternativa nas localidades com boa infraestrutura de fornecimento de energia e de recarga, porém muitos dos seus habitantes têm dificuldades para comprá-los devido ao baixo poder de compra que possuem correlacionado aos altos custos de aquisição.

Outra possibilidade é realizar a conversão dos veículos a combustão interna para elétricos, mas Globisch *et al.* (2018) afirmaram que os altos custos podem impedir organizações menores de realizarem esse procedimento para um número maior de veículos de suas frotas, o que também passa pela diminuição dos preços das baterias. Margaritis *et al.* (2016) mostraram que uma das soluções é utilizar estações de troca de bateria, onde o processo de conversão passaria pela fase de instalação das baterias e teste de funcionamento, após já ter sido realizada a remoção da embreagem, do radiador e do tanque, a substituição do motor a combustão interna pelo elétrico, a instalação do controlador e a conexão dos cabos elétricos. Souza (2018) explicou que o controlador é o componente que controla a passagem de corrente elétrica para o motor, evitando picos de corrente que podem prejudicar o funcionamento do veículo. Utilizando uma empilhadeira elétrica manual, o processo é realizado pelo motorista em 5 a 7 minutos e mostra-se competitivo pois seus custos são bem menores. Quak *et al.* (2016a) falaram que outro problema é que veículos adaptados costumam enfrentar mais problemas técnicos que os novos elétricos produzidos.

Outros fatores que levarão à redução dos preços são o aumento da produção dos veículos elétricos que se verificará com o decorrer do tempo e o desenvolvimento de processos aprimorados para reduzir o custo de produção. Tanco *et al.* (2019) mostraram que os preços no futuro tendem a diminuir para valores entre 50 US\$/kWh a 100 US\$/kWh ou até menores para novas tecnologias de baterias. Também afirmou ainda que em 2030 as baterias irão compor 18% do custo dos veículos, comparados a 48% em 2016.

#### **4.2.3 Desconhecimento dos usuários**

Para solucionar o problema da desconfiança de muitos motoristas quanto à nova tecnologia dos veículos elétricos, além da transição feita com os modelos

híbridos, citada anteriormente, Wang e Thoben (2017) comentaram que as empresas de logística estão investindo financeiramente em treinamentos para que os motoristas se adaptem às peculiaridades técnicas e operacionais dos VEs e os conduzam com eficiência, por exemplo, saber quantos quilômetros podem percorrer antes de uma recarga ser necessária e aproveitar ao máximo a recuperação de energia através da frenagem regenerativa, que é aumentada com o uso de pneus mais leves. Como o salário dos motoristas está relacionado ao tempo de trabalho, quando a eficiência é melhorada pelo e no emprego de VEs, o tempo de trabalho será reduzido de forma que o salário dos motoristas também seja reduzido, trazendo mais um benefício econômico proveniente do uso dos veículos elétricos. Wikström *et al.* (2015) falaram que para o sistema OnC, motoristas com treinamento adequado adquirem o conhecimento das especificações técnicas dos veículos e aumentam a frequência de entregas diárias. Manter um salário adequado aos motoristas mesmo com a redução, com o treinamento garantindo uma condução eficiente e confortável, aliadas à expansão das redes urbanas de recarga e a facilidade de serem veículos de marcha automática e saudáveis, pois não emitem poluentes atmosféricos e GEE, além dos níveis de ruídos serem muito baixos, leva os condutores a terem uma visão positiva do uso dos VEs, e as experiências obtidas no trabalho os levam a usarem VEs também em seus veículos particulares e a divulgarem suas vantagens, proporcionando a chegada de novos usuários ao ramo.

Atualmente, o desempenho tecnológico, a confiabilidade dos VEs (Quak *et al.*, 2016a), o gerenciamento térmico e as eficiências energética e dos acessórios auxiliares (Yuksel e Michalek, 2015) ainda dependem muito dos modelos utilizados e das suas idades, o que influencia diretamente no alcance dos veículos. Empresas que já implantaram os veículos elétricos e obtiveram resultados satisfatórios, com base na experiência adquirida, decidem por expandir a participação dos VEs em suas frotas. A imagem “verde” que as empresas apresentam as ajudam, aliadas à manutenção do nível de serviço, a fortalecer o relacionamento com os clientes existentes e a conquistar novos, porém muitos ainda relutam devido a um possível aumento nos preços de entrega oriundo da utilização dos VEs, mas a maioria deles garantiu que caso os preços sejam iguais, os escolheriam. Outro problema é que a maioria dos clientes não tem conhecimento se receberão seus produtos por um veículo a combustão interna ou elétrico, o que atrapalha a divulgação da imagem corporativa positiva devido ao uso dos VEs. Quak *et al.* (2016b) fizeram um levantamento em que motoristas, depois de conduzirem os VEs por alguns meses, em sua maioria ficaram satisfeitos devido

aos avanços tecnológicos que facilitam as manobras e estacionamento em áreas mais densas e ruas estreitas, sendo estes o ângulo de curva agudo, raio de giro menor e melhor visibilidade, além de elogiarem sua maior aceleração e os considerarem visualmente mais atraivos.

Globisch *et al.* (2018) falaram que a adoção de inovações nas organizações consiste num processo de três fases: iniciação, decisão e implementação. A iniciação pode vir por uma motivação intrínseca, quando uma pessoa pensa ser interessante o negócio, ou extrínseca, quando o motivo é algo por fora. A segunda pode ser autônoma, como por exemplo, os benefícios ambientais, e uma pessoa apresenta suas ideias baseadas no motivo para os tomadores de decisão de uma organização que decidem se vão investir no novo negócio, ou controlada, quando um funcionário se torna um agente para divulgar e conseguir realizar os objetivos da empresa, como uma favorável relação custo-benefício, com um TCO vantajoso em comparação com os veículos convencionais, em um período de retorno o mais rápido possível; as preferências dos líderes por tecnologias inovadoras e/ou trazer uma imagem “verde” para a empresa.

Ehrler *et al.* (2020) disseram que conhecer características como tamanho da frota, tipo de serviço realizado, de carga transportado, propriedade e uso dos veículos, padrões de horário de turno de trabalho, expectativas dos usuários e perceber como ocorre a adequação das organizações ao uso de VEs, podem ajudar os líderes a desenvolverem e divulgarem seus negócios, trazendo um crescimento exponencial para esta atividade.

#### **4.2.4 Autonomia**

Quak *et al.* (2016a) comentaram que o pensamento em relação à autonomia dos VEs mudou. Obviamente, mantém-se a ideia que o aumento do alcance das baterias beneficiará a todos, mas as empresas estão privilegiando, através de testes e demonstrações, descobrir quais os segmentos de carga e operações da logística mais adequados aos VEs levando em consideração todos os detalhes da cadeia de suprimentos, já que a introdução completa destes no frete urbano não será rápida. Um fato que vem colaborando para o sucesso dessa ideia é o número cada vez maior de empresas adicionando VEs às suas frotas.

Outra solução é desenvolver uma adequada roteirização, já que como as distâncias das jornadas normalmente são conhecidas com antecedência, as rotas podem ser otimizadas para se ajustarem à autonomia dos VEs. Ehrler *et al.* (2020) comentaram que nesse contexto devem ser conhecidas características

como rotas média, mais longa e mais curta, números médio, máximo e mínimo das paradas para recarga, tempo destas e do descarregamento das mercadorias. Além disso, afirmaram que os sistemas inteligentes de planejamento de rotas são o elo de conexão entre os conceitos inovadores de frete urbano e os veículos elétricos, porque a roteirização baseada em experiências anteriores tem limitações quanto aos VEs, e podem ajudar a acelerar de maneira bem-sucedida a mudança dos veículos convencionais para os elétricos. Juan *et al.* (2016) definiram tempo de rota como o período entre a partida e o retorno ao depósito menos o tempo acumulado de entrega aos clientes.

Também falaram que estratégias de roteirização ajudam a reduzir os tempos de parada para recarga e de espera nas filas nas estações. Lin *et al.* (2016) demonstraram que na roteirização, o conjunto de vértices é formado pelos clientes, depósito, estações de recarga no percurso, independentemente de serem ou não visitadas e do total de visitas pela frota, sendo que uma delas está localizada dentro do depósito e pode haver outras no momento de entrega das mercadorias e nos terminais de transbordo quando houver. A presença de pontos de recarga deve ser ampliada nos locais de descarregamento das mercadorias e terminais de transbordo, porque mesmo quando não utilizados, são essenciais para reduzir a ansiedade de alcance dos motoristas.

#### **4.2.5 Mercado de segunda mão**

Chen *et al.* (2019) mostraram que existem três opções para as baterias em fim de vida útil: remanufatura, reaproveitamento e reciclagem, e dependem do seu design, qualidade e SoH (*State of Health*). Os dois primeiros estendem o uso das baterias, enquanto o terceiro encerra o ciclo, portanto, o ideal seria que elas fossem remanufaturadas ou reaproveitadas primeiro, para depois serem recicladas. A remanufatura consiste na reforma das baterias e suas etapas são o diagnóstico, desmontagem parcial, substituição de células e/ou módulos danificados e remontagem para serem novamente utilizadas em VEs, e é o método mais aconselhável para maximizar o valor, minimizar o consumo de energia e as emissões do ciclo de vida. Porém, é a opção mais rigorosa em termos de qualidade da bateria e devem atender os requisitos de SoH mínimo, potência, energia e ciclo de vida para a realização do processo. Por exemplo, quando um pacote de baterias é incapaz de manter a capacidade desejada, a remanufatura não é economicamente viável e o reaproveitamento é mais adequado. A remanufatura de LIBs degradadas economiza cerca de 70% do custo de uso de novas baterias.

O reaproveitamento é o método em que as baterias são reconfiguradas para uma segunda utilização em aplicações menos exigentes, como por exemplo, sistemas estacionários de armazenamento de energia, extraindo mais valor e estendendo sua vida útil além da primeira utilização. Não requer apenas a substituição de células e/ou módulos danificados, mas também a reconfiguração dos módulos e/ou pacotes, estabelecendo um novo sistema de gerenciamento de bateria (BMS) para ser inserido na nova utilização. Os BMSs podem ser utilizados para transmitir informações de SoH e com isso, agilizar as operações de teste e classificação, que junto à reembalagem, são os principais custos de reconfiguração para o reaproveitamento das baterias. Ainda enfrentam diversos desafios para sua melhor utilização, sendo esses a confiabilidade dos pacotes ou módulos, diferentes projetos e métricas de desempenho, os riscos de utilização em funções não-originais e a desconfiança de alguns clientes por se tratarem de baterias degradadas, que pode ser resolvida se os fabricantes fornecerem serviços de garantia, consultoria, instalação, manutenção e modelos de negócios baseados em serviços. Todas essas dificuldades devem ser solucionadas para obterem vantagens na competição com baterias novas.

A reciclagem é a opção que pode acomodar baterias de todos os modelos e SoH, porém, a quantidade de elementos químicos nas LIBs impõe alguns obstáculos técnicos e econômicos. Os pacotes de LIBs são estruturas complexas, compostas por vários módulos, nos quais inúmeras células, de geometria prismática ou cilíndrica, são conectadas em diferentes configurações seriais-paralelas, como soldagem, ligação de fios e junção mecânica. Wang *et al.* (2020) explicaram que a reciclagem das LIBs é essencial por dois motivos principais. O primeiro é que as LIBs gastas contêm uma variedade de substâncias tóxicas, como metais pesados, compostos orgânicos e inorgânicos, alguns destes cancerígenos, que são propensos a reações químicas e danos ao meio ambiente. Isso ocorre porque alguns desses componentes das baterias têm difícil decomposição e se descartados inadequadamente em aterros sanitários, podem poluir o solo e as águas subterrâneas. O segundo é que elementos como o lítio e o cobalto são escassos em alguns países, o que mantém a necessidade de suas importações e por isso, reciclar esses metais valiosos é fundamental para manter o crescimento do mercado de VEs. Hoekstra (2019) comentou que uma das funções das baterias pode ser operar equipamentos de recuperação dos minérios contidos em outras baterias, painéis solares ou moinhos de vento.

Ir diretamente da primeira utilização no veículo para a reciclagem é menos recomendável do ponto de vista do ciclo de vida, pois forneceram benefícios

insuficientes, o desempenho é incerto e ocorrerão inevitáveis perdas de materiais e energia no processo. As vantagens da reciclagem são que as baterias se tornam parte da economia circular ao invés de resíduos descartáveis, com isso, materiais valiosos retornam mais rapidamente para a cadeia de valor, diminuindo a necessidade de extração de novos recursos, o que reduz as emissões de GE-E; sua capacidade de crescimento e facilidade de processamento, e por isso, é o método mais aplicável para baterias em fim de vida útil.

Iwan *et al.* (2019) falaram que muitos países em desenvolvimento importam veículos usados de outros mais ricos. Há uma previsão que o número de VEs nos primeiros aumente de 4 a 5 vezes até 2050 e que a maioria desses veículos seja de segunda mão. Porém, esses países normalmente precisam implementar regulamentos de descarte e de transporte mais rigorosos para os VEs e para as baterias e melhores instalações de reciclagem, já existentes em países mais ricos europeus, como a França e a Noruega, asiáticos, como a China e o Japão, e norte-americanos, como os EUA e o Canadá, que possuem vantagens econômicas e de acesso a materiais essenciais por conta disso. No caso brasileiro, é necessário aprimorar a logística reversa implementada pelo Programa Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e distribuir as instalações por todo o país para obter ganhos econômicos, ambientais e logísticos, fato necessário por ser um país de dimensões continentais.

Steward *et al.* (2019) apresentaram a lei de reciclagem de veículos elétricos do Japão, na qual os proprietários são obrigados a pagar uma taxa pela reciclagem ao comprar um veículo para que a responsabilidade seja dividida entre eles, as empresas de coleta e reciclagem e os fabricantes dos veículos. Na União Europeia, os fabricantes são os responsáveis por organizar e financiar a coleta, tratamento e reciclagem dos veículos, porém, requisitos administrativos onerosos e a relutância das autoridades em cobrar dos fabricantes os custos associados aos programas de reciclagem vêm sendo empecilhos no desenvolvimento da economia circular. Zivancev *et al.* (2018) demonstraram que este princípio de legislação e políticas utilizado na União Europeia é denominado “Responsabilidade Estendida do Produtor”, no qual os fabricantes são responsáveis por todas as etapas do ciclo de vida de um produto.

É fundamental o gerenciamento, rastreamento, mecanismos eficazes, regulamentos proativos e inovações tecnológicas em relação ao descarte, coleta e reciclagem dos VEs para que o processo seja bem sucedido também para as LIBs. Alguns problemas que ainda enfrentam são que nem todos os veículos retirados de serviço são coletados e depois direcionados para reciclagem ou



recuperação; operadores não licenciados que removem apenas peças economicamente valiosas; o abandono ou tentativa de conserto pelos proprietários, sem serem destinados às empresas de coleta e reciclagem; e alguns VEs quando chegam ao fim da vida útil são descartados em sucatas, quando o ideal seria que sua coleta fosse realizada nas concessionárias.

Dois métodos de reciclagem de VEs são mais utilizados: a desmontagem e a trituração. A desmontagem tem como vantagens menores emissões de GEE, principalmente, devido à energia recuperada pela incineração de polímeros ricos em energia, e menor depleção de metais, devido à boa recuperação de cobre. Para reciclar as LIBs, é necessário um processo de desmontagem semelhante ao utilizado para removê-las dos VEs, o que contribui para reduzir o risco da necessidade de triturar as baterias, que em todas as etapas devem estar totalmente descarregadas por questões de segurança. A desmontagem das baterias apresenta as etapas de remoção do sistema de gerenciamento, coberturas, carcaças, fiação, conectores e cabos, realizadas manualmente com o uso de uma chave de fenda. Devido às diferentes configurações entre os modelos de veículos, o processo tem remotas chances de ser automatizado atualmente, o que aumenta seus custos e duração ao menos no curto prazo. O potencial de automação desta etapa é menos influenciado pelas variações químicas do que a reciclagem dos módulos das baterias.

Sonoc *et al.* (2015) detalharam através do processo *Recupyl* como é a sequência, caso sejam necessárias na reciclagem, tanto a desmontagem quanto a trituração. Primeiramente, a bateria é desmontada por uma máquina de corte rotativa e depois triturada por outro sistema de rotor. Ambas as etapas ocorrem em um recinto hermético preenchido com uma atmosfera inerte de argônio e CO<sub>2</sub>, o que impede uma reação mais expressiva do lítio. Os resíduos de oxigênio e a pressão no recinto são monitorados continuamente e esses dados são utilizados por um sistema para controlar a taxa de injeção dos gases inertes. Após a trituração, são obtidas frações de finos ricas em óxidos de metal e carbono, além de uma fração magnética composta por invólucros, uma fração não magnética de alta densidade feita dos coletores de corrente de alumínio e cobre, e uma última fração pouco densa de papel e plástico. Ainda sob a atmosfera inerte, as frações são separadas e, a fração de finos é, por sua vez, adicionada à água. O lítio nos finos reage com a água e libera hidrogênio. A água é agitada e, assim sendo, mais finos são adicionados, mas de maneira controlada para evitar o acúmulo de hidrogênio e uma consequente explosão originada de uma reação exotérmica entre o lítio e o oxigênio.

Outra precaução para evitar explosões é manter a atmosfera pobre em oxigênio. A água então fica rica em hidróxido de lítio e o lítio é recuperado pela adição de carbonato de sódio ou ácido fosfórico e o restante dos materiais é, por sua vez, recuperado por meios hidrometalúrgicos.

Em todas as etapas do processo de reciclagem, as baterias devem estar totalmente descarregadas por questões de segurança. Ao descarregar completamente a bateria, os íons de lítio livres são imobilizados no catodo, onde formam um óxido de metal de lítio termodinamicamente estável que não reage com a água ou com o ar e, assim sendo, também não há mudança de temperatura. É necessário realizar um tratamento prévio, porque abrir as baterias da mesma forma que se encontram ao serem retiradas dos veículos pode resultar em uma reação explosiva entre os íons de lítio e o ar devido à reação exotérmica dos íons de lítio com o oxigênio, mas esta etapa ainda necessita de alto consumo de energia para ser realizada. Para a abertura segura das baterias, mesmo totalmente descarregadas, esta abertura deve ocorrer em áreas bem ventiladas e livre de faíscas, para que os riscos inflamáveis e tóxicos dos eletrólitos devido à emissão de vapores e gases quando expostos ao ar sejam mitigados. Atualmente, se buscam maneiras para evoluir esse processo de retirar uma célula por vez no laboratório para várias células por vez em escala industrial.

Um importante teste a ser feito após a remoção das células é, com o uso de um voltímetro, determinar suas resistências internas e, a partir delas, inferir o estado de cada célula e verificar se alguma foi danificada, como por meio de um curto-circuito interno e, então, separá-las. Após o referido teste, cada elemento das baterias deve ter retirada sua carga através da imersão em salmoura ou de um resistor mais imersão em lixiviação e, posteriormente, devem ser abertos ao ar em um espaço ventilado. Os materiais do catodo e do ânodo são separados manualmente e imersos em solução de lixiviação. Ambos os processos de retirada da carga necessitam de baixo consumo de energia, diferentemente do tratamento prévio.

Quando os elementos das baterias têm sua energia retirada em salmoura, sua voltagem inicial está acima da voltagem de eletrólise da água, o que leva a produção de hidrogênio e oxigênio, que devem ser ventilados para evitar uma explosão. Quando esse processo é feito por um resistor, a corrente deve ser mantida baixa o suficiente para que os elementos não superaqueçam, sendo que as células precisam ser mantidas em no máximo 90° C. No caso de células danificadas, deve-se avaliar se há quantidades significativas de metal de lítio no ânodo que, caso expostos ao ar ou à água, poderiam provocar reações explosi-

vas. Por isso, a reciclagem deve ser realizada através de processos que incluem incineração ou imersão em nitrogênio líquido ou a abertura deve ser realizada sob uma atmosfera inerte.

Outro fator que ajuda nessa atividade é que o processo de desmontagem esteja localizado junto à coleta dos VEs, se não os veículos devem ser direcionados para uma instalação de desmontagem. Depois do desmonte, os materiais constituintes são transportados para o processamento final em instalações de reciclagem ou de recuperação de energia. Os componentes dos custos incluem a energia para a operação das fábricas de desmontagem e para cada etapa, transporte, mão-de-obra, armazenamento e manuseio dos veículos e baterias. Steward *et al.* (2019) demonstraram que os custos de transporte representam 70% do total da reciclagem dos VEs, incluindo a coleta, desmontagem e a incineração para recuperar energia e materiais. Chen *et al.* (2019) falaram que existem vários métodos de reciclagem atualmente, mas nenhum é perfeito e esforços são necessários para seus aprimoramentos, como acompanhar as pesquisas de novos materiais e designs de baterias que estão em rápida evolução, o que requer métodos flexíveis, economicamente e tecnicamente viáveis e de alta eficiência. Três tecnologias, usadas isoladamente ou combinadas, são empregadas comercialmente para reciclar as LIBs: pirometalurgia, hidrometalurgia e reciclagem direta. Todas se mostraram econômicas em comparação com a extração de matérias-primas para realizar a composição das baterias.

#### **4.2.5.1 Pirometalurgia**

Tecnologia mais avançada, implantada em larga escala na Europa, EUA e Japão, o processo pirometalúrgico é formado por duas etapas: na primeira, as LIBs são queimadas em uma fundição a altas temperaturas, onde os compostos químicos são decompostos e os materiais orgânicos, como o plástico e o separador, são queimados. Em seguida, novas ligas metálicas são geradas através da redução do carbono. Nas etapas seguintes, geralmente hidrometalúrgicas, as ligas metálicas são separadas para recuperar materiais puros, mas apenas metais caros como cobalto e níquel do catodo e o cobre do coletor de corrente do ânodo são recuperados com maior eficiência. O ânodo, o eletrólito e o plástico são oxidados e fornecem energia para o processo. O lítio sai junto à fração de escória e pode ser recuperado com um processamento adicional, que aumenta os custos totais de reciclagem e o consumo de energia, além do preço do lítio reciclado ainda ser bastante elevado. O alumínio serve como redutor no forno.

As principais vantagens da pirometalurgia são um processo simples e

maduro; não é necessária a classificação e redução do tamanho das baterias, uma mistura de LIBs e NiMHs pode ser reciclada; e os materiais recuperados podem ser usados na síntese de novos materiais catódicos de diferentes químicas. Suas desvantagens são a geração de CO<sub>2</sub> e alto consumo de energia durante o processo de fundição; a limpeza dos gases é necessária para evitar a liberação de substâncias tóxicas; as ligas metálicas requerem processamentos adicionais; muitos dos materiais das LIBs, como plásticos, grafite e alumínio não são recuperados; e o modelo de negócios pode não funcionar bem para as LIBs utilizadas em VEs devido à tendência de reduzir o seu teor de cobalto.

#### 4.2.5.2 Hidrometalurgia

Implantada principalmente na China e em seguida pelo Canadá, na hidrometalurgia os metais são recuperados utilizando soluções aquosas, através da lixiviação por ácidos, bases, ou por microrganismos, esta denominada biolixiviação, e na sequência, concentração e purificação. Nas LIBs, os íons são separados por diversos métodos: troca iônica, quando ocorre a transferência de íons específicos de uma solução pouco concentrada para outra de maior concentração através de uma resina, que remove os íons da água trocando-os por íons H<sup>+</sup> e OH<sup>-</sup> quando entram em contato; extração por solvente, quando um solvente é utilizado para dissolver e separar um ou mais metais em uma mistura heterogênea de líquidos imiscíveis; precipitação química, quando um agente precipitante reage com o metal e forma um sólido denominado precipitado, que no caso das LIBs é um sal insolúvel, que se separou da solução devido à supersaturação de uma das substâncias; e a eletrólise, que consiste na decomposição química da solução em seus componentes mediante a passagem de uma corrente elétrica.

As principais vantagens da hidrometalurgia são: materiais de alta pureza podem ser gerados; a maioria dos elementos químicos que constituem as LIBs pode ser recuperada; pode recuperar lítio e transformá-lo em carbonato de lítio, usado para fabricar novos acumuladores de lítio; o processo ocorre em baixas temperaturas; e menor emissão de CO<sub>2</sub> em comparação com a pirometalurgia. Suas desvantagens são: necessidade de classificação, o que requer maior espaço de armazenamento, aumentando o custo e a complexidade do processo; o desafio de separar alguns elementos (cobalto, níquel, manganês, cobre e alumínio), devido às suas propriedades semelhantes, o que pode levar a custos mais altos; as águas residuais e produtos químicos das etapas de lixiviação, coprecipitação e lavagem aumentam os custos de reciclagem e é necessário reutilizar e reduzir a quantidade de água para eliminar as águas residuais ou então

se pode purificá-las; e atualmente o foco principal está na recuperação do material catódico devido ao seu alto valor e é necessário desenvolver tecnologias para recuperar os materiais eletrolíticos e o grafite do ânodo como materiais de alto valor, para aumentar ainda mais a viabilidade econômica desse processo.

#### **4.2.5.3 Reciclagem direta**

A reciclagem direta é um método emergente usado para coletar e recuperar diretamente os materiais ativos das LIBs mantendo a estrutura original do composto. Os componentes da bateria são separados através de processos de separação física ou magnética e, utilizando um processamento térmico moderado para evitar a decomposição química dos materiais ativos, que são purificados e seus defeitos de superfície e na cristalografia são reparados por processos hidrotérmicos ou de relutação. Pode ser usada para recondicionar células antigas e recuperar a pureza de catodos e ânodos antes de colocá-los de volta nas células, trazendo grandes economias de custos. O processo mais utilizado é a extração por solvente, na qual o CO<sub>2</sub> supercrítico auxilia a extrair os materiais dos ânodos e catodos.

As principais vantagens da reciclagem direta são: ser um processo relativamente simples; os materiais ativos podem ser reutilizados diretamente após a recuperação; e menores consumo de energia e emissões de poluentes e CO<sub>2</sub> em comparação com os dois processos anteriores. Suas desvantagens são: requer uma classificação e pré-processamento rigoroso com base na química do material ativo; é difícil garantir uma estrutura cristalina consistente, de alta pureza e intocada que atenda aos rigorosos padrões exigidos pela indústria de baterias; é um método que está apenas em escala de laboratório no momento, sem uso comprovado em uma tecnologia; a inflexibilidade do processo, que pode não ser apropriado para atender às mudanças na química do catodo; os catodos podem ser uma mistura de diferentes materiais ativos e sua separação pode não ser economicamente ou tecnicamente viável; os materiais de diferentes químicas NMC ainda não podem ser separados, dificultando sua classificação; ainda não há um meio eficaz de separar os materiais anódicos, catódicos e os plásticos; o processo, assim como os dois anteriores, é muito focado nos materiais catódicos, que representam apenas de 30 a 40% dos custos totais; e os materiais recuperados podem não apresentar desempenho tão bom quanto os virgens.

#### **4.2.6 Temperaturas extremas**

Em temperaturas muito baixas, as reações eletroquímicas que ocorrem no interior das baterias, com a migração de elétrons de um eletrodo para o outro,

tornam-se mais lentas e reduzem a eficiência, a energia disponível e a capacidade de descarga, podendo levá-las a perderem até 41% de sua capacidade (Reis, 2019). Isso é explicado porque a resistência interna da bateria aumenta, diminuindo a energia que pode ser extraída. O efeito das temperaturas baixas é maior porque o aquecimento elétrico da cabine consome mais energia que o resfriamento e a ventilação. Em uma bateria de íon de lítio modelo NMC, os efeitos da resistência interna são insignificantes e um pré-condicionamento térmico da cabine pode aumentar o alcance em cerca de 24% em climas frios, sem o processo de aquecimento (Yuksel e Michalek, 2015).

O desempenho melhora em temperaturas altas, mas ocorre uma aceleração de elétrons que causa uma perda mais rápida da massa ativa, que é formada pelas placas, o que significa que a bateria está descarregando mais rápido, mantendo a necessidade de requisitos de gerenciamento térmico. Além disso, o calor também ajuda na evaporação da água do eletrólito. Tudo isso aumenta a autodescarga e o processo de corrosão dos componentes da bateria, e pode levar a ocorrer sobrecargas no sistema elétrico e, em casos extremos, até explosões por conta dos gases da corrosão e evaporação (Chiptronic, 2018). O pré-condicionamento térmico da cabine antes da viagem nessas condições aumentaria o alcance em cerca de 10% (Yuksel e Michalek, 2015).

Yuksel e Michalek (2015) explicaram que a temperatura ambiente determina as temperaturas da bateria inicial e durante o uso e a carga de gerenciamento térmico necessária. Se o veículo estiver inicialmente estacionado do lado de fora, a bateria não é pré-condicionada termicamente e a radiação solar é insignificante.

Uma das soluções para reduzir a ansiedade de alcance dos motoristas nestas situações seria os veículos possuírem no painel um indicador da faixa restante, consumo de energia em tempo real e o SoC. Esta medida ajuda em projetos para VEs de carga futuros, porque a falta de dados realistas sobre o consumo de energia ainda é um empecilho, sobretudo correlacionados à temperatura ambiente, que deve ser analisada em suas variações sazonal, diária e geográfica. Outro fator que deve ser aprimorado para esta situação é o treinamento dos condutores, para que devido às mudanças ocorridas nas condições das jornadas como possíveis congestionamentos, baixa visibilidade, consumo de energia maior devido ao aquecedor ou ar condicionado e elementos climáticos como chuvas, neve e umidade, utilizem ciclos de condução adequados às temperaturas.

Existem dois modos de dissipação de calor para as baterias, sendo estes

conhecidos como em série e paralelo. No em série, quanto mais longe o líquido refrigerante está da entrada do tubo, mais alta é sua temperatura, o que leva a um baixo período de temperatura constante da bateria. Além disso, quanto mais comprido for o tubo, maior será a resistência ao fluxo e mais energia será necessária. Para resolver estes problemas, no modo paralelo, baterias e tubos são embutidos de forma que fiquem em contato uns com os outros e deve haver espaços para a entrada e saída do fluxo da água de resfriamento. Deve-se evitar que, próximo da entrada, fortes turbilhões de água sejam gerados e para isso, o valor da vazão deve ser devidamente ajustado, o que reduz o consumo de energia do sistema e as perdas no fluxo do fluido. Um modelo de dissipador de calor paralelo é demonstrado na Figura 11.

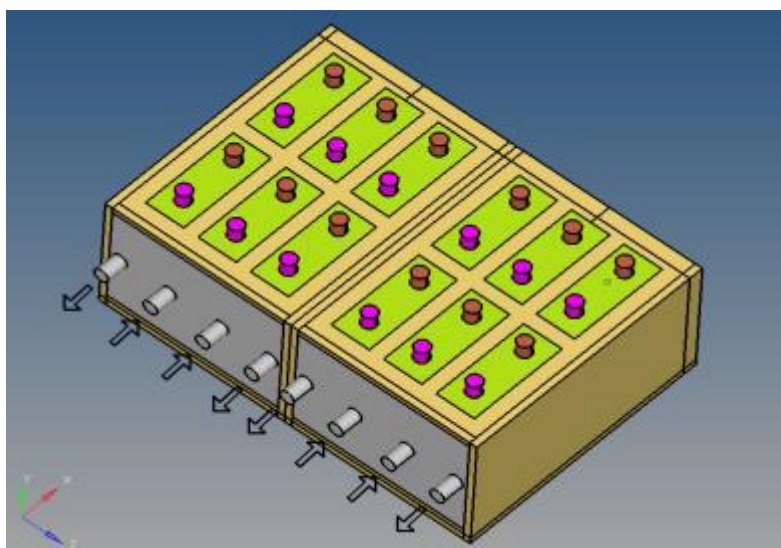


Figura 11 - Dissipador de calor paralelo para baterias

Fonte: Zhang e Yu (2019)

Fundação Getúlio Vargas (2017) mostrou que outra solução para aumentar a autonomia dos VEs em temperaturas extremas é integrar as baterias com supercapacitores, que são mais utilizados em veículos de grande porte, o que beneficia os caminhões de maior capacidade de carga útil, mas também já apresentam viabilidade para veículos comerciais leves. Além disso, explicou que os supercapacitores também são acumuladores de energia elétrica e possuem alta densidade de potência, diferentemente das baterias de íon de lítio, que apresentam alta densidade energética, o que significa que podem fornecer e armazenar altas quantidades de potência em curtos intervalos de tempo, o que é essencial nos momentos de aceleração e frenagem dos veículos elétricos. As baterias fornecem corrente, porém em intensidade máxima limitada, já os supercapacitores são capazes de fornecer picos de correntes de intensidade elevada, de dezenas a centenas de vezes maiores que as baterias, porém no máximo por poucos

minutos, devido à baixa quantidade de energia que armazenam.

O uso de um supercapacitor combinado à bateria permite reduzir a quantidade de energia necessária para cada um isoladamente e o tempo de recarga, e com a introdução de um sistema eletrônico para fazer o gerenciamento da combinação, os veículos ganham um considerável aumento de eficiência, o que reduz seus custos de energia e o total de células necessárias por módulo. Como barreira a esse sistema, os supercapacitores, assim como as baterias, apresentam custo elevado.

### 4.3 Políticas públicas de incentivo sugeridas

Vaz *et al.* (2015) citaram que, além dos incentivos fiscais mencionados anteriormente, nas áreas financeira e de infraestrutura, outras práticas, como gratuidade em estacionamentos públicos; uso de faixas exclusivas; restrições ao acesso de veículos a combustão interna em determinados períodos em certas localidades, nas chamadas Zonas de Baixa Emissão (LEZ), incluindo políticas de taxaço de congestionamento para reduzir a presença desses veículos, sobretudo os pesados, reduzindo os congestionamentos e cumprindo a pressão regulatória global de redução de veículos pesados. As LEZ, portanto, apresentam três propostas distintas que se complementam na busca da sustentabilidade global. Chaud *et al.* (2012) demonstraram que, em Londres, a taxaço de congestionamento é gerida por uma empresa privada sob fiscalizaço do governo e as receitas obtidas são investidas em melhorias do sistema de transporte. A prática já levou à diminuiço do volume de tráfego e, conseqüentemente, reduço dos congestionamentos e dos tempos de viagem. Os autores citam também que em São Paulo, caminhões médios e grandes não podem circular em algumas das principais vias de 5 às 21 horas nos dias úteis e de 10 às 14 horas aos sábados, exceto feriados, com os objetivos de reduzir as emissões, os congestionamentos e os acidentes, principalmente no horário de pico, na chamada Zona de Máxima Restriço de Circulaço.

Para WRI Brasil (2019), o sucesso de uma LEZ depende muito da maneira de como a medida é comunicada e promovida, sendo importante consultar a população e todos os interessados sobre a maneira mais adequada e justa de operação, deixando claros os objetivos e estratégias. Por mais difícil que seja a avaliação, é provável que as LEZ resultem na diminuiço dos níveis de poluentes atmosféricos e GEE também fora da área delimitada, já que veículos mais limpos irão circular por toda a cidade. Para Mirhedayatian e Yan (2018), a medida é a que mais ajuda a aumentar a qualidade de vida da população porque re-



duz em grande número os custos externos, especialmente em regiões de população elevada, poluição densa e tráfego pesado. Foltynski (2014) falou que em 's-Hertogendenbosch, cidade histórica de tamanho médio da Holanda, há uma zona ambiental onde somente caminhões limpos são permitidos.

Outras propostas sugeridas foram a isenção de pedágios em rodovias e de taxas de circulação em centros urbanos; vagas cativas em estacionamentos, descontos no seguro do veículo e dispensa de inspeções vêm sendo implementados por todo o mundo para concretizar o objetivo de introduzir os veículos elétricos no mercado, inclusive as bicicletas. Rizet *et al.* (2016) sugeriram como políticas: a prioridade ou obrigação das entregas em determinadas áreas serem realizadas por veículos elétricos; a autorização para que os VEs realizem entregas durante todo o dia, enquanto os demais têm restrições de horário; e o aluguel de veículos movidos a bateria. Quak *et al.* (2016a) sugeriram iniciativas de acesso prioritário, como acesso a faixas para veículos de alta ocupação, janela de tempo de atendimento aos clientes estendida e isenção de restrição de peso máximo.

A parceria das distribuidoras de energia elétrica com fabricantes de veículos e de pneus, fornecedores e transportadoras de frete urbano será de grande importância para ganhar apoio nas negociações junto aos governos para a formulação de políticas e de iniciativas que promovam os veículos elétricos como: a redução de taxas; prática de subsídios diretos para a compra de veículos e construção de redes de recarga; definição adequada de encargos e impostos sobre o preço da energia elétrica, que devem ser menores do que sobre os derivados do petróleo; e no caso brasileiro, com a redução do IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados) e ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços).

Ehrler *et al.* (2020) falaram que outra parceria que tem como objetivo identificar os segmentos do transporte de carga mais adequados a uma mudança rápida para os VEs e promover seu desenvolvimento é entre as montadoras de equipamentos originais (OEM) e o governo, que financia instituições de pesquisa e, em conjunto, obtêm as respostas desejadas através de projetos-piloto e avaliam o desenvolvimento do tema por meio de curvas de aprendizagem. Com isso, os custos, riscos e lucros da abertura do mercado aos VEs serão repartidos entre os vários atores do negócio e todos serão beneficiados com sua expansão, tendo suas imagens associadas à sustentabilidade e, se posicionando assim, na vanguarda desta inovação.

Iwan *et al.* (2019) afirmaram que as autoridades públicas são o principal

agente influenciador da aceitação dos veículos elétricos de frete urbano através de apoios monetário e não monetário. Naumanen *et al.* (2019) concluíram que sem rigorosas regulamentações de emissões para as montadoras e frotas privadas, é improvável que aconteça uma transição significativa para a mobilidade elétrica. Mirhedayatian e Yan (2018) explicaram que há dois tipos principais de impostos para os veículos: o de registro e o de circulação, o segundo pago para usar o veículo na estrada. Sugeriram duas possibilidades: que os VEs sejam isentos de ao menos um desses impostos ou que com uma taxa de desconto apropriada, esses dois impostos funcionem da mesma forma. Quak *et al.* (2016a) comentaram que atualmente, existe um entendimento que os incentivos não monetários têm grande importância, porque os financeiros não se sustentam a longo prazo.

Para o sistema OnC de recarga de energia, que apresenta como desvantagens o maior peso da bateria e por consequência, menor carga útil e maiores custos, é possível que os preços da eletricidade possam ser mais atraentes à noite, durante o horário das recargas, do que durante o dia, devido a subsídios comerciais ou governamentais; os incentivos para o uso de energia durante a noite ajudariam a equilibrar a carga na rede, reduziriam os custos de capital e operacional e maximizariam o uso de fontes de energia renováveis, como a eólica (Nicolaidis *et al.*, 2018a), em expansão no sistema energético brasileiro. A diferença de custos para o sistema CoM reduziria bastante, apesar de permanecerem superiores, porém as atividades para as quais o sistema OnC é o utilizado para recarga de energia experimentariam uma considerável redução nas despesas.

Uma política pública ainda muito incipiente no Brasil, mas já em avançado estágio de desenvolvimento em países como Alemanha e Japão é a chamada *Feed in Tariff* (FIT), que visa incentivar a adoção de fontes de energia renováveis. Consiste no pagamento de tarifas para as geradoras que produzirem energia por meios alternativos, como o uso de painéis fotovoltaicos nos telhados das casas, nos prédios comerciais e industriais para abastecer tanto sistemas isolados quanto redes de alimentação de energia elétrica. O principal objetivo é viabilizar a implementação de centrais produtoras, cujas despesas para gerar energia são relativamente altas (Solarvolt, 2015).

As tarifas são determinadas por contratos de longo prazo, em períodos entre 10 a 20 anos. Esse tempo é necessário para que as produtoras possam desenvolver fontes alternativas sem elevar seus custos. Neste sistema é estabelecida uma cota de energia que é obrigatoriamente comprada pelas centrais e-

nergéticas. Esse valor é repassado aos consumidores por elas atendidos e dividido igualmente entre eles. Com isso, o aumento da taxa de energia fica menor do que as contas tradicionais de energia elétrica. Um fato importante a se destacar é que após a aprovação desta e das demais políticas, deve ser avaliada se é possível suas transferências para outras localidades de acordo com as características de cada estado ou região. Por exemplo, a região Nordeste teria facilidade para implantar a FIT produzindo energia eólica, devido à grande potência instalada na localidade, porém esta política não seria bem sucedida no Norte e Centro-Oeste do Brasil atualmente, pois, não há a instalação de parques eólicos nessas regiões.

Wolinetz e Axsen (2017) *apud* Naumanen (2019) disseram que, sem políticas públicas, a proporção das vendas anuais de PEVs no mercado de 2020 a 2030 deve crescer apenas de 1,4% para 7%, porém com fortes incentivos políticos para a demanda, esse valor deve crescer para entre 17% a 28%. Os autores consideram que as principais políticas que levariam a este resultado são subsídios à compra e implantação em larga escala de equipamentos de recarga nas vias urbanas. Com incentivos ou exigências para que as montadoras aumentem a disponibilidade e variedade de modelos de PEVs, estes podem chegar a representar 30% das vendas do mercado de veículos.

Wang e Thoben (2016) afirmam que os subsídios à compra dos VEs podem ser divididos em duas categorias e os governos, por sua vez, definem qual será a escolhida. A primeira categoria é baseada nos veículos de zero emissão e o percentual dos subsídios são constantes para todos os BEVs. A segunda categoria é baseada na capacidade de energia da bateria e na forma de recarga. Com isso, os PHEVs que apresentem a mínima capacidade de energia da bateria exigida, podem receber subsídios iguais aos BEVs de capacidade semelhante e, quanto maior for essa capacidade, maiores os subsídios.

#### 4.4 Soluções propostas no âmbito do cenário estudado

A seguir, são evidenciadas as soluções propostas para resolver cada desafio ainda enfrentado pelos veículos elétricos descritos ao longo deste estudo. As soluções propostas são aquelas que atualmente apresentam benefícios técnicos e/ou financeiros que podem ajudar na resolução do tema proposto.

##### 1. Desconhecimento dos usuários:

- a) **Transição através dos veículos híbridos:** Benefício técnico representado pela combinação do motor a combustão interna com um ou mais motores elétricos, fazendo com que os veículos híbridos sejam mais

amadurecidos tecnologicamente que os veículos elétricos. Já o benefício econômico é representado pelo custo de aquisição inferior aos veículos puramente elétricos. Juan *et al.* (2016) afirmam que, nos países onde essa transição ocorreu, a mudança de frota foi beneficiada em cerca de 30%;

- b) **Treinamento dos condutores:** Benefício técnico representado pela permissão que esta ação irá oferecer aos condutores de se adaptarem às peculiaridades técnicas e operacionais dos veículos elétricos. Já o benefício econômico é representado pela condição financeira que muitas empresas já possuem atualmente para investir em treinamentos para seus condutores. Juan *et al.* (2016) afirmam que, nos países onde houve esse treinamento, a transição de frota foi beneficiada em mais de 60% nas empresas responsáveis.

## 2. Altos custos de aquisição:

- a) **Pesquisas para a produção de baterias mais baratas:** O benefício econômico dessas pesquisas será grandioso, já que as baterias são o elemento mais caro dos veículos elétricos e, conseqüentemente, a redução de seus respectivos preços acarretaria na redução do preço total dos veículos elétricos. Nicolaides *et al.* (2018b) afirmam que, nos principais países da Europa, essas pesquisas promoveram um expressivo aumento de cerca de 60% dos investimentos em transição de frota por parte das empresas responsáveis, por otimizarem as perspectivas de maior autonomia para o frete rodoviário sustentável.

## 3. Baixa autonomia:

- a) **Testes e demonstrações:** O benefício técnico consequente é representado pela descoberta dos segmentos de carga e operações logísticas mais adequados aos veículos elétricos. Nicolaides *et al.* (2018b) afirmam que, em alguns países da Europa, como Inglaterra e Suécia, os testes e demonstrações representam cerca de 20% dos investimentos no setor de transporte rodoviário e, por não ser um investimento tão grandioso, o retorno é de cerca de 45% para as empresas em novos benefícios e contratos privilegiados por parte do governo, caso novos projetos de pesquisa sejam desenvolvidos para facilitar a transição de frota por parte das empresas envolvidas;
- b) **Roteirização:** O benefício técnico é representado pela existência de sistemas inteligentes de planejamento de rotas capazes de realizarem esta atividade, uma vez que a maioria das distâncias já é de conhecimento

prévio das empresas responsáveis que atuam no setor. Nicolaidis *et al.* (2018b) afirmam que a otimização de rota com serviços de inteligência e logística cada vez mais sofisticados é capaz de dar um retorno expressivo de cerca de 70% para as empresas do setor de transporte rodoviário, proporcionando ganhos em autonomia e na realização de mais atividades sustentáveis no dia a dia.

#### 4. Alto tempo de recarga:

- a) **Estações de recarga rápida:** O benefício técnico está representado pela possibilidade de fornecimento de uma recarga de 80% e de cerca de 100 a 160 quilômetros de alcance em torno de 20 minutos de recarga. Já o benefício econômico é refletido no fato de que os custos para a implantação de estações de recarga rápida são relativamente equiparados com outros empreendimentos de infraestrutura urbana. Nicolaidis *et al.* (2018a) afirmam que os países que adotaram esse tipo de empreendimento aceleram a transição de frota em cerca de 55%;
- b) **Implantação do sistema de recarga subterrânea:** O benefício técnico é representado pela manutenção do estado de carga em níveis elevados, reduzindo o tempo ocioso para paradas de recarga. Já os benefícios econômicos são, por sua vez, representados, por exemplo, pela redução dos custos de recarga, já que nesta condição, seria um serviço gratuito e pelo aumento da carga útil dos veículos e, conseqüentemente, a capacidade e o lucro das entregas realizadas também seriam expandidos;
- c) **Impantação de estações de troca de bateria:** O benefício técnico ocorre, pois estas estações são capazes de realizarem trocas de baterias em menos de 10 minutos e, caso sejam automatizadas, em cerca de apenas 5 minutos. Já o benefício econômico é representado pelo fato de os custos destas estações serem inferiores quando comparados com as estações de recarga rápida. Nicolaidis *et al.* (2018a) afirmam que, embora não sejam a principal solução no âmbito do cenário em questão, as estações de troca de bateria oferecem um suporte à economia circular dos países onde foram implementadas, contribuindo para um crescimento de cerca de 15% na transição de frota, desde que esses países já possuam boa infraestrutura de estações de recarga rápida.

#### 5. Autodescarga ou resistência interna da bateria em temperaturas extremas:

- a) **Condicionamento térmico prévio da cabine dos veículos:** O benefício técnico é representado pelo aumento do alcance em relação às perdas de eficiência da bateria. Steward *et al.* (2019) afirmam que as montado-

ras que adotaram esse condicionamento como item prioritário no desenvolvimento de seus novos caminhões elétricos em alguns países da Europa, obtiveram cerca de 45% de ganho de autonomia de bateria, aumentando a confiabilidade de seus veículos no mercado;

- b) **Painel de informações nos veículos:** O benefício técnico é representado pela indicação da faixa restante, do consumo de energia em tempo real e do estado de carga.

6. Baixos níveis de mercado de segunda mão para as baterias:

- a) **Remanufatura das baterias:** O benefício técnico é representado pela redução do consumo de energia e das emissões do ciclo de vida. Já o benefício econômico é representado pela maximização do valor das baterias e pela economia de mais de 70% do respectivo custo para substituí-las;
- b) **Reaproveitamento das baterias:** O benefício técnico é representado pela extensão da vida útil da bateria além de sua respectiva primeira utilização. Já o benefício econômico é representado pela maior extração de maior valor do uso das baterias. Steward *et al.* (2019) afirmam que alguns países da Europa que adotaram o procedimento de reaproveitamento a fim de privilegiar a economia circular do setor, obtiveram um ganho de cerca de 30% na transição de frota;
- c) **Reciclagem das baterias:** O benefício técnico é representado pela capacidade de acomodar os mais diversos modelos de baterias com distintas capacidades nominais que, dessa forma, passam a fazer parte da economia circular do setor.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

No que se refere à respectiva introdução dos veículos elétricos no setor de transporte rodoviário de cargas, tem-se que a referida introdução já teve início em alguns mercados, porém de maneira lenta e gradual. Dessa forma, é primordial ter o conhecimento dos respectivos segmentos de carga e operações de logística que são mais adequados para permitir a transição da frota de veículos tradicionais movidos a combustão para uma nova frota de veículos elétricos.

Nesse cenário, tem-se que as preocupações com as reduções de emissões de gases do efeito estufa e suas trágicas consequências para o meio ambiente, além de poluentes atmosféricos que causam graves danos à saúde da população, são as mais importantes. Entretanto, ressalta-se ainda a existência da preocupação referente às fontes de energia que deram origem à energia elétrica, sendo fundamental, dessa forma, a utilização de fontes de energia renováveis para que a eletricidade gerada seja uma fonte de energia limpa desde a sua produção até a sua utilização.

Porém, por se tratar de uma tecnologia ainda estágio de maturação, os veículos elétricos apresentam desafios relacionados a sua respectiva introdução no setor de transporte de cargas como, por exemplo, a existência de uma infraestrutura necessária para seu funcionamento, os altos custos de aquisição, a baixa autonomia, o elevado tempo de recarga, além do mercado de segunda mão ainda incipiente para as baterias e seus demais componentes. Tais desafios podem representar um obstáculo ainda considerável para que a população e as empresas não optem por investirem nos veículos elétricos, mesmo com seus inúmeros benefícios do ponto de vista ambiental e de sustentabilidade.

Assim sendo, tem-se que as soluções propostas para serem implementadas, visando o crescimento dos veículos elétricos na atividade do transporte urbano de carga são:

- Investimentos em pesquisas que levem à respectiva produção de baterias menos custosas, já que estas são o elemento mais caro dos veículos elétricos;
- Utilizar sistemas avançados de roteirização que proporcionem o máximo em termos de extração da autonomia dos veículos elétricos;

- Implantar diferentes infraestruturas de carga como, por exemplo, estações de recarga rápida ou de troca de baterias;
- Instalar no subterrâneo das principais rodovias sistemas de recarga por indução magnética;
- Investir no treinamento dos condutores para que estes possam se adaptar às peculiaridades técnicas e operacionais dos veículos e, dessa forma, possam conduzi-los de maneira eficiente, sobretudo em temperaturas extremas;
- Investir no desenvolvimento da chamada economia circular, por meio de processos de remanufatura, reaproveitamento e reciclagem.

A partir dos resultados obtidos através da metodologia proposta para o presente estudo, verifica-se o excelente potencial que o veículo elétrico possui e, em função disso, é possível ressaltar a relevância do tema e as respectivas justificativas apresentadas para incentivar o processo de transição da frota de veículos tradicionais para novas frotas de veículos elétricos no setor de transporte rodoviário de carga.

Além disso, o estudo em questão também enaltece as principais políticas públicas internacionais voltadas a incentivos fiscais, infraestruturas e fomento de negócios de apoio ao transporte rodoviário de carga por veículos elétricos e como essas políticas apresentaram resultados positivos nos mercados internacionais onde foram implementadas.

Do ponto de vista ambiental, a contribuição da transição de frota de veículos tradicionais movidos a combustão interna para veículos elétricos no setor do transporte rodoviário de carga do Brasil será fundamental no âmbito da sustentabilidade. Com a realização de atividades diárias de frete por meio dos veículos elétricos, as empresas responsáveis do setor contribuirão expressivamente para melhorias ambientais, econômicas e sociais no Brasil. Entretanto, é importante ressaltar que as empresas precisam ter o respaldo necessário do governo para modernizarem suas frotas, usufruindo de benefícios e incentivos fiscais capazes de proporcionar as melhores condições para a transição de frota e para a implementação da infraestrutura adequada. Dessa forma, o governo brasileiro, em parceria com as empresas do setor de transporte rodoviário de cargas, oferecerá sua contribuição para o tão importante aspecto ambiental da sociedade brasileira.

A partir dos resultados obtidos, é recomendado para trabalhos futuros, estudos direcionados à legislação brasileira e, conseqüentemente, propostas de metodologias capazes de permitir a respectiva importação e posterior adaptação



das políticas públicas internacionais bem sucedidas ao modelo de negócio brasileiro, visando expandir os incentivos fiscais e investimentos em infraestrutura para colaborar com a transição gradual da frota de veículos convencionais para a frota de veículos elétricos no setor nacional de transporte rodoviário de carga.

Além disso, novas pesquisas na área de reciclagem de materiais e de outros componentes constituintes dos veículos elétricos também são indicadas, visando possibilitar o aprimoramento e, até mesmo, a criação de novas metodologias no ainda incipiente mercado de segunda mão do setor.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. (2018) **Perfil da indústria brasileira do alumínio**. Disponível em: <<http://abal.org.br/estatisticas/nacionais/perfil-da-industria/>>. Acesso em: 26/03/2020.

ABEEÓLICA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. (2019) **InfoVento nº 14**. Disponível em: <[http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/02/Infovento-14\\_PT.pdf](http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/02/Infovento-14_PT.pdf)>. Acesso em: 21/03/2020.

ABSOLAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTO-VOLTAICA. (2020) **Infográfico Absolar**. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar-.html>>. Acesso em: 21/03/2020.

ASSUMPÇÃO, F. C. (2016) **Veículos elétricos de carga – uma análise de sua evolução histórica, perfil e possível utilização no Brasil**. 61f. Trabalho de conclusão de curso de graduação em Engenharia Ambiental. UFRJ, Rio de Janeiro – RJ.

ATUALIDADE PARLAMENTO EUROPEU. (2013) **Serão os “carros ecológicos” o futuro do transporte europeu?** Disponível em: <<https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20130211STO05806/serao-os-carros-ecologicos-o-futuro-do-transporte-europeu>>. Acesso em: 19/10/2020.

AVEKA (2020). **What is cryogenic milling?** Disponível em: <<https://www.aveka.com/processing/cryo-milling/>>. Acesso em: 16/07/2020.

BALM, S. H. e HOGT, R. (2017) **Designing Light Electric Vehicles for urban freight transport**. In: EVS30 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stuttgart, Alemanha.

BBC. (2018) **V2G, o sistema que permite a carros elétricos devolver energia não utilizada**. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/geral-43745137>>. Acesso em: 22/08/2020.

BANDEIRA, R. A. M.; GÓES, G. V.; GONÇALVES, D. N. S.; D'AGOSTO, M. A. e OLIVEIRA, C. M. (2019) **Electric vehicles in the last mile of urban freight transportation: A sustainability assessment of postal deliveries in Rio de Janeiro-Brazil**. In: Transportation Research Part D, v. 67, p. 491-502.

BARAN, R. e LEGY, L. F. L. (2011) **Veículos elétricos: história e**

**perspectivas no Brasil.** In: BNDES Setorial, Rio de Janeiro - RJ, n. 33, p. 207-224.

BLUESOL ENERGIA SOLAR. (2017) **A energia solar funciona à noite? [Veja se você acertou].** Disponível em: <<https://blog.bluesol.com.br/energia-solar-funciona-a-noite/>>. Acesso em: 31/07/2020.

BORTHAKUR, S. e SUBRAMANIAN, S. C. (2018) **Optimized design and analysis of a series-parallel hybrid electric vehicle powertrain for a heavy duty truck.** In: IFAC PapersOnLine, v. 51, n. 1, p. 184-189.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D. e ROCIO, M. A. R. (2014) **A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira?** In: BNDES Setorial, Rio de Janeiro - RJ, n. 40, p. 205-234.

CASTRO, F. A.; SZKLO, A. S. e ALMEIDA, S. C. A. (2013) **Estudo de viabilidade de substituição da arquitetura veicular em caminhão de coleta.**

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. (2019) **Qualidade do ar – poluentes.** Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>>. Acesso em: 06/11/2020.

CHAUD, C. A.; GALVÃO, L. C. e UDAETA, M. E. M. (2012) **Análise da mobilidade urbana para inclusão de caminhões elétricos visando uma logística sustentável.** In: Anais do XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ABEPRO, Bento Gonçalves – RS.

CHEN, M.; MA, X.; CHEN, B.; ARSENAULT, R.; KARLSON, P.; SIMON, N. e WANG, Y. (2019a) **Recycling end-of-life electric vehicle lithium-ion batteries.** In: Joule, v. 3, n. 11, p. 2622-2646.

CHIPTRONIC. (2018) **Entenda por que as baterias automotivas sofrem mais danos no verão.** Disponível em: <<https://chiptronic.com.br/blog/por-que-as-baterias-automotivas-sofrem-mais-danos-no-verao>>. Acesso em: 29/09/2020.

CORREIOS. (2014) **Correios testa novos veículos para entrega de encomendas em SP e MG.** Disponível em: <<https://blog.correios.com.br/correios/?p=11262>>. Acesso em: 27/07/2020.

CPFL ENERGIA. (2019) **Tipo 1 – SAE J1772.** Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/sites/mobilidade-eletrica/mobilidade-e/tipos-de-plug/Paginas/Tipo%201%20-%20SAE-J1772.aspx>>. Acesso em: 21/10/2020.

DIAS, D. e RODRIGUEZ, H. (2018) **As vantagens e (poucas) desvanta-**

**gens da direção elétrica.** Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/auto-servico/as-vantagens-e-poucas-desvantagens-da-direcao-eletrica/>>. Acesso em: 15/07/2020.

EHRLER, V. C.; LOBIG, A. e RISCHKE, D. (2020) **Chapter 12: E-vehicles for urban logistics – why is it not happening yet? – Requirements of an innovative and sustainable urban logistics concept.** In: Urban Freight Transportation Systems, p. 223-238.

EHRLER, V. C.; SCHÖDER, D. e SEIDEL, S. (2019) **Challenges and perspectives for the use of electric vehicles for last mile logistics of grocery e-commerce – Findings from case studies in Germany.** In: Research in Transportation Economics 100757.

ENEL X. (2016) **Tudo sobre Energia Solar: tipos de Sistema On Grid e Off Grid** .Disponível em: <<https://www.enelx.com.br/blog/2016/06/energia-solar-tipos-de-sistema-on-grid-e-off-grid/>>. Acesso em: 27/08/2020.

ENERGYSAGE. (2019) **Charging your EV: how do EV charging stations work?** Disponível em: <<https://www.energysage.com/electric-vehicles/charging-your-ev/>>. Acesso em: 21/07/2020.

ESCOLA EDTI. (2018) **Just in time: vantagens e desvantagens.** Disponível em: <<https://www.escolaedti.com.br/just-in-time-vantagens-e-desvantagens/>>. Acesso em: 21/08/2020.

EVOBSESSION. (2015) **SCANIA, SIEMENS begin testing trolley-like electric trucks.** Disponível em: <<https://evobsession.com/scania-siemens-begin-testing-trolley-like-electric-trucks/>>. Acesso em: 23/07/2020.

EVTOWN. (2015) **Levels of charging.** Disponível em: <<http://www.evtown.org/about-ev-town/ev-charging/charging-levels.html>>. Acesso em: 21/04/2020.

FELDMAN, B. (2018) **O etanol é um combustível mais limpo que a gasolina?** Disponível em: <<https://autopapo.com.br/blog-do-boris/o-etanol-e-um-combustivel-mais-limpo-que-a-gasolina/>>. Acesso em: 15/08/2020.

FENG, W. e FIGLIOZZI, M. A. (2012) **Conventional vs electric commercial vehicle fleets: A case study of economic and technological factors affecting the competitiveness of electrical commercial vehicles in the USA.** In: Procedia Social and Behavioral Sciences, v. 39, p. 702-711.

FERRO, G.; PAOLUCCI, M. e ROBBA, M. (2018) **An Optimization Model For Electrical Vehicles Routing with time of use energy pricing And partial Recharging.** In: IFAC PapersOnLine, v. 51, issue 9, p. 212-217.

FIORI, C. e MARZANO, V. (2018) **Modelling energy consumption of**

**electric freight vehicles in urban pickup/delivery operations: analysis and estimation on a real-world dataset.** In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 65, p. 658-673.

FOLTYNSKI, M. (2014) **Electric fleets in urban logistics.** In: Procedia Social and Behavioral Sciences, v. 151, p. 48-59.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV) (2017) **Carros elétricos.** Ano 4, n. 7.

GANGLOFF, J. J.; KAST, J.; MORRISON, G. e MARCINKOSKI, J. (2017) **Design space assessment of hydrogen storage onboard medium and heavy duty fuel cell electric trucks.** In: Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, v. 14, n. 2.

GLOBISCH, J.; DÜTSCHKE, E. e WIETSCHKE, M. (2018) **Adoption of electric vehicles in commercial fleets: Why do car pool managers campaign for BEV procurement?** In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 64, p. 122-133.

GOMES, A. C. A.; RODRIGUES, A. S.; DIAS, C. C. G. S. e DINIZ, C. F. D. (2018) **Utilização de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica híbrida (*off grid* e *on grid*) em caminhões frigoríficos.** In: Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar, Gramado – RS.

GROUPE RENAULT. (2019) **RENAULT Z. E. PASS.** Disponível em: <<https://easyelectriclife.groupe.renault.com/en/glossary/renault-z-e-pass/>>. Acesso em: 17/10/2020.

HOEKSTRA, A. (2019) **The underestimated potential of battery electric vehicles to reduce emissions.** In: Joule, v. 3, n. 6, p. 1412-1414.

HUDA, M.; AZIZ, M. e TOKIMATSU, K. (2018) **Potential ancillary services of electric vehicles (vehicle-to-grid) in Indonesia.** In: Energy Procedia, v. 152, p. 1218-1223.

IWAN, S.; ALLESCH, J.; CELEBI, D.; KIJEWSKA, K.; HOÉ, M.; KLAUENBERG, J. e ZAJICEK, J. (2019) **Electric mobility in European urban freight and logistics – status and attempts of improvement.** In: Transportation Research Procedia, v. 39, p. 112-123.

IWAN, S.; KIJEWSKA, K. e KIJEWSKI, D. (2014) **Possibilities of Applying Electrically Powered Vehicles in Urban Freight Transport.** In: Procedia Social and Behavioral Sciences, v. 151, p. 87-101.

JAOUA, A.; BEN AMMAR, M. e AWASTHI, A. (2019) **A Decision Support System for On-Demand Goods Delivery Using Shared Autonomous Electric Vehicles.** In: International Journal of Decision Support System Technology, v. 11, issue 2, p. 72-88.

JUAN, A. A.; MÉNDEZ, C. A.; FAULIN, J.; ARMAS, J. e GRASMAN, S. E. (2016) **Electric vehicles in logistics and transportation: a survey on emerging environmental, strategic, and operational challenges**. In: *Energies*, v. 9, n. 2, p. 1-21.

KAMPKER, A.; KREISKÖTHER, K.; BÜNING, M. K. e GÓMEZ, J. G. D. (2018) **Technological and Total Cost of Ownership Analysis of Electric Powertrain Concepts for Long-Haul Transport in Comparison to Traditional Powertrain Concepts**. In: 2018 8<sup>th</sup> International Electric Drives Production Conference, EDPC 2018.

KARASINSKI, L. (2013) **Como são produzidas as baterias de lítio?** Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/bateria/42123-como-sao-produzidas-as-baterias-de-litio-.htm>>. Acesso em: 06/07/2020.

KAWAKAMI, Y.; KOMIYAMA, R. e FUJII, Y. (2018) **Penetration of electric vehicles toward 2050: analysis utilizing an energy system model incorporating high-temporal-resolution power generation sector**. In: *IFAC PapersOnLine*, v. 51, n. 28, p. 598-603.

KIJEWSKA, K.; IWAN, S. e MALECKI, K. (2019) **Applying multi-criteria analysis of electrically powered vehicles implementation in urban freight transport**. In: *Procedia Computer Science*, v. 159, p. 1558-1567.

LAPETITEREINE. (2019) **NOTRE FLOTTE**. Disponível em: <<http://lapetitereine.com/notre-flotte/>>. Acesso em: 09/11/2020.

LEBEAU, P.; MACHARIS, C., MIERLO, J. V. e MAES, G. (2013) **Implementing electric vehicles in urban distribution: A discrete event simulation**. In: *World Electric Vehicle Journal*, v. 6, n. 1, p. 38-47.

LEBKOWSKI, A. (2017) **Electric vehicles trucks – overview of technology and research selected vehicle**. In: *Scientific Journal of Gdynia Maritime University*, n. 98, p. 157-165.

LEE, D.; ELGOWAINY, A.; KOTZ, A.; VIJAYAGOPAL, R. e MARCINKOWSKI, J. (2018) **Life-cycle implications of hydrogen fuel cell electric vehicle technology for medium- and heavy-duty trucks**. In: *Journal of Power Sources*, v. 393, p. 217-229.

LEONARDI, J.; BROWNE, M. e ALLEN, J. (2012) **Before-after assessment of a logistics trial with clean urban freight vehicles: A case study in London**. In: *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, v. 39, p. 146-157.

LIIMATAINEN, H.; VLIET, O. V. e APLYN, D. (2019) **The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis**. In: *Applied Energy*, v. 236, p. 804-814.

LIN, J.; ZHOU, W. e WOLFSON, O. (2016) **Electric vehicle routing**

**problem.** In: Transportation Research Procedia, v. 12, p. 508-521.

LIRA, J. C. L. (2011) **Terra-rara.** Disponível em: <<https://www.infoescola.com/elementos-quimicos/terra-rara/>>. Acesso em: 10/07/2020.

LUNA, T. F.; VOLAN, T.; VAZ, C. R. e MALDONADO, M. U. (2019) **Barreiras para transição de carros elétricos: uma análise do cenário brasileiro.** In: Anais do XXI Engema: Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, FIA, USP, São Paulo – SP.

MARGARITIS, D.; ANAGNOSTOPOULOU, A.; TROMARAS, A. e BOILE, M. (2016) **Electric commercial vehicles: Practical perspectives and future research directions.** In: Research in Transportation Business and Management, v. 18, p. 4-10.

MELO, S. e BAPTISTA, P. (2017) **Evaluating the impacts of using cargo cycles on urban logistics: integrating traffic, environmental and operational boundaries.** In: European Transport Research Review, v. 9, n. 2, issue 30.

MELO, S.; BAPTISTA, P. e COSTA, Á. (2014) **Comparing the use of small sized electric vehicles with diesel vans on city logistics.** In: Procedia - Social and Behavioral Sciences, v. 111, p. 350-359.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA (2020). **Frota de veículos – 2020.** Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/frota-de-veiculos-2020>>. Acesso em: 10/12/2020.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. (2018) **Energia limpa: Brasil registra 88% de fontes renováveis na produção de energia em junho.** Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/energia-limpa-brasil-registra-88-de-fontes-renovaveis-na-producao-de-energia-em-junho](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/energia-limpa-brasil-registra-88-de-fontes-renovaveis-na-producao-de-energia-em-junho)>. Acesso em: 01/09/2020.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2020) **Poluentes atmosféricos.** Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosfericos.html>>. Acesso em: 11/07/2020.

MIRHEDAYATIAN, S. M. e YAN, S. (2018) **A framework to evaluate policy options for supporting electric vehicles in urban freight transport.** In: Transportation Research Part D, v. 58, p. 22-38.

MOOLENBURGH, E. A.; VAN DUIN, J. H. R.; BALM, S.; VAN ALTENBURG, M. e VAN AMSTEL, W. P. (2020) **Logistics concepts for light electric freight vehicles: a multiple case study from the Netherlands.** In: Transportation Research Procedia, v. 46, p. 301-308.

MUNDI, M. (2016) **A beleza das piscinas de lítio no deserto do Atacama.** Disponível em: <<https://www.magnusmundi.com/a-beleza-das-piscinas-de-litio-no-deserto-de-atacama/>>. Acesso em: 06/07/2020.

NAUMANEN, M.; UUSITALO, T.; HUTTUNEN-SAARIVIRTA, E. e VAN DER HAVE, R. (2019). **Development strategies for heavy duty electric battery vehicles: Comparison between China, EU, Japan and USA.** In: Resources, Conservation & Recycling, v. 151, 104413.

NAVARRO, C.; ROCA-RIU, M.; FURIÓ, S. e ESTRADA, M. (2016) **Designing new models for energy efficiency in urban freight transport for smart cities and its application to the Spanish case.** In: Transportation Research Procedia, v. 12, p. 314-324.

NICOLAIDES, D.; CEBON, D. e MILES, J. (2018a) **An urban charging infrastructure for electric road freight operations: a case study for Cambridge UK.** In: IEEE Systems Journal, v. 13, n. 2, p. 2057-2068.

NICOLAIDES, D.; CEBON, D. e MILES, J. (2018b) **Prospects for electrification of road freight.** In: IEEE Systems Journal, v. 12, n. 2, p. 1838-1849.

NISSAN. (2018) **Descubra a NISSAN E-NV200 - furgão 100% elétrico para o seu negócio.** Disponível em: <<https://www.nissan.pt/veiculos/novos-veiculos/e-nv200.html>>. Acesso em: 02/07/2020.

PALENCIA, J. C. G.; ARAKI, M. e SHIGA, S. (2017) **Energy consumption and CO2 emissions reduction potential of electric-drive vehicle diffusion in a road freight vehicle fleet.** In: Energy Procedia, v. 142, p. 2936-2941.

PATRUS TRANSPORTES URGENTES. (2017) **Entenda quais são os tipos de transporte de cargas.** Disponível em: <<http://www.patrus.com.br/blogpatrus/?p=554>>. Acesso em: 24/08/2020.

PENA, R. F. A. (2015) **Smog.** Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/smog.htm>>. Acesso em: 03/06/2020.

PESSANHA, J. F. M.; PERES, L. A. P.; CALDAS, A. C. I. L. e PARTICELLI, F. M. F. (2011) **Cenários para o mercado de veículos elétricos na cidade do Rio de Janeiro.** In: Anais do IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, ABEE, Juiz de Fora – MG.

PLÖTZ, P.; GNANN, T.; JOCHEM, P.; YILMAZ, H. U. e KASCHUB, T. (2019) **Impact of electric trucks powered by overhead lines on the European electricity system and CO2 emissions.** In: Energy Policy, v. 130, p. 32-40.



PORCHERA, G. S. O.; LOSS, M. E. S.; MIRANDA, P. H. R. e LEAL, E. A. S. (2016) **Vantagens e barreiras à utilização de veículos elétricos**. In: Anais do XIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, AEDB, Resende – RJ.

PRATES, W. R. (2016) **O que é custo de capital de uma empresa?** Disponível em: <<https://www.wrprates.com/o-que-e-custo-de-capital-de-uma-empresa/>>. Acesso em: 07/10/2020.

QUAK, H.; NESTEROVA, N. e VAN ROOIJEN, T. (2016a) **Possibilities and barriers for using electric-powered vehicles in city logistics practice**. In: Transportation Research Procedia, v. 12, p. 157-169.

QUAK, H.; NESTEROVA, N.; VAN ROOIJEN, T. e DONG, Y. (2016b) **Zero emission city logistics: current practices in freight electromobility and feasibility in the near future**. In: Transportation Research Procedia, v. 14, p. 1506-1515.

QUICKBOOKS. (2016) **Giro de estoque: o que é e como calcular**. Disponível em: <<https://quickbooks.intuit.com/br/blog/controle-estoque/giro-estoque-como-calcular/>>. Acesso em: 23/09/2020.

RASTANI, S.; YÜKSEL, T. e ÇATAY, B. (2019) **Effects of ambient temperature on the route planning of electric freight vehicles**. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 74, p. 124-141.

REIS, P. (2019) **Porque é que os carros elétricos não gostam do frio?** Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/carros-eletricos-frio-145071/>>. Acesso em: 21/09/2020.

REPARAÇÃO AUTOMOTIVA. (2018) **Veículos de “zero emissão” são de verdade “zero emissão”?** Disponível em: <<https://www.reparacaoautomotiva.com.br/single-post/2018/05/16/Veiculos-de-zero-emissao-sao-de-verdade-zero-emissao>>. Acesso em: 06/08/2020.

RIZET, C.; CRUZ, C. e VROMANT, M. (2016) **The constraints of vehicle range and congestion for the use of electric vehicles for urban freight in France**. In: Transportation Research Procedia, v. 12, p. 500-507.

RIZET, C. e HOAI-THU, T. (2019) **Economic Cost of Urban Freight GHG Mitigation**. In: Advances in Intelligent Systems and Computing, v. 879, p. 394-401.

ROCHA, L. (2015) **Afinal, por que as baterias de lítio podem pegar fogo?** Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/bateria/81577-baterias-litio-pegar-fogo.htm>>. Acesso em: 05/07/2020.

SEN, B.; ERCAN, T. e TATARI, O. (2017) **Does a battery-electric truck**

**make a difference? – Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States.** In: Journal of Cleaner Production, v. 141, p. 110-121.

SIQUEIRA, F. (2019) **Efeito memória.** Disponível em: <<https://espacodigital.tv/blog/efeito-memoria-causa-prevencao-espaco-digital/>>. Acesso em: 22/07/2020.

SISTEMA SINDIPEÇAS FROTA CIRCULANTE NACIONAL. (2019) **Relatório da frota circulante.** Disponível em: <[https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2019/RelatorioFrotaCirculante\\_Maio\\_2019.pdf](https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2019/RelatorioFrotaCirculante_Maio_2019.pdf)>. Acesso em: 02/10/2020.

SOLARVOLT. (2015) **Net metering e feed in: saiba o que são e como funcionam.** Disponível em: <<https://www.solarvoltenergia.com.br/blog/net-metering-e-feed-in-saiba-o-que-sao-e-como-funcionam/>>. Acesso em: 25/05/2020.

SONOC, A.; JESWIET, J. e SOO, V. K. (2015) **Opportunities to improve recycling of automotive lithium ion batteries.** In: Procedia CIRP 29, p. 752-757.

SOUZA, G. (2018) **Converter carro a gasolina para elétrico: Como fazer?** Disponível em: <<https://carroelettrico.com.br/blog/converter-carro-elettrico/>>. Acesso em: 21/04/2020.

SOVACOOOL, B. K.; KESTER, J.; NOEL, L. e RUBENS, G. Z. (2019) **Income, political affiliation, urbanism and geography in stated preferences for electric vehicles (EVs) and vehicle-to-grid (V2G) technologies in Northern Europe.** In: Journal of Transport Geography, v. 78, p. 214-229.

STEWART, D.; MAYYAS, A. e MANN, M. (2019) **Economics and challenges of Li-ion battery recycling from end-of-life vehicles.** In: Procedia Manufacturing, v. 33, p. 272-279.

TAEFI, T. T.; STÜTZ, S. e FINK, A. (2017) **Assessing the cost-optimal mileage of medium-duty electric vehicles with a numeric simulation approach.** In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 56, p. 271-285.

TALEBIAN, H.; HERRERA, O. E.; TRAN, M. e MÉRIDA, W. (2018) **Electrification of road freight transport: Policy implications in British Columbia.** In: Energy Policy, v. 115, p.109-118.

TANCO, M.; CAT, L. e GARAT, S. (2019) **A break-even analysis for battery electric trucks in Latin America.** In: Journal of Cleaner Production, v. 228, p. 1354-1367.

TEOH, T.; KUNZE, O e TEO, C. (2016) **Methodology to evaluate the**

**operational suitability of electromobility systems for urban logistics operations.** In: Transportation Research Procedia, v. 12, p. 288-300.

TRIBUNA DO NORTE. (2010) **Bateria e alternador: a energia do seu automóvel.** Disponível em: <<http://www.tribunadonorte.com.br/noticia/bateria-e-alternador-a-energia-do-seu-automovel/150228>>. Acesso em: 15/09/2020.

USGS – United States Geological Survey. (2017) **Nickel statistics and information.** Disponível em: <<https://www.usgs.gov/centers/nmic/nickel-statistics-and-information>>. Acesso em: 26/07/2020.

VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C. e CASTRO, B. H. R. (2015) **Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento.** In: BNDES Setorial, Rio de Janeiro - RJ, n. 41, p. 295-344.

VORA, A. P.; JIN, X.; HOSHING, V.; SAHA, T.; SHAVER, G.; VARIGONDA, S.; WASYNCZUK, O. e TYNER, W. E. (2017) **Design-space exploration of series plug-in hybrid electric vehicles for medium-duty truck applications in a total cost-of-ownership framework.** In: Applied Energy, v. 202, p. 662-672.

WANG, M. e THOBEN, K. (2016) **Selecting appropriate types of electrical commercial vehicles for the sustainable urban freight transport.** In: EVS30 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Stuttgart, Alemanha.

WANG, M. e THOBEN, K. (2017) **Sustainable urban freight transport: Analysis of factors affecting the employment of electric commercial vehicles.** In: 5<sup>th</sup> International Conference LDIC, Bremen, Alemanha, p. 255-265.

WANG, S.; TIAN, Y.; ZHANG, X.; YANG, B.; WANG, F.; XU, B.; LIANG, D. e WANG, L. (2020) **A review of processes and technologies for the recycling of spent lithium-ion batteries.** In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, v. 782, n. 2, 022025.

WIKSTRÖM, M.; HANSSON, L. e ALVFORS, P. (2015) **An end has a start – investigating the usage of electric vehicles in commercial fleets.** In: Energy Procedia, v. 75, p. 1932-1937.

WRI BRASIL. (2019) **A experiência de 3 cidades com as zonas de baixa emissão de poluentes.** Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/blog/2019/01/experiencia-de-3-cidades-com-zonas-de-baixa-emissao-de-poluente>>. Acesso em: 20/10/2020.

YUKSEL, T. e MICHALEK, J. J. (2015) **Effects of regional temperature on electric vehicle efficiency, range, and emissions in the United States.** In: Environmental Science and Technology, v. 49, n. 6, p. 3974-3980.

ZHANG, L. W. e YU, Y. S. (2019) **Simulation of thermal characteristics of lithium batteries for electric vehicles**. In: IOP Conference Series: Material Science and Engineering, v. 657, n. 1.

ZHAO, F.; LIU, F.; LIU, Z. e HAO, H. (2019) **The correlated impacts of fuel consumption improvements and vehicle electrification on vehicle greenhouse gas emissions in China**. In: Journal of Cleaner Production, v. 207, p. 702-716.

ZIVANCEV, M.; UBAVIN, D.; MARINKOVIC, T.; BEZANOVIC, V. e MILOVANOVIC, D. (2018) **Possibilities for implementation of circular economy for lithium-ion batteries in Serbia**. In: 1<sup>st</sup> International Conference "The Holistic Approach to Environment", p. 812-819, Sisak, Croatia.