



IGHOR FELIPE DE MELO QUEIROZ

LARA COTA TEIXEIRA

**VEÍCULOS ELÉTRICOS SÃO A MELHOR SOLUÇÃO PARA MITIGAÇÃO
DA EMISSÃO DE CO₂ NO SETOR DE TRANSPORTE?**

LAVRAS-MG

2023

IGHOR FELIPE DE MELO QUEIROZ

LARA COTA TEIXEIRA

**VEÍCULOS ELÉTRICOS SÃO A MELHOR SOLUÇÃO PARA MITIGAÇÃO
DA EMISSÃO DE CO₂ NO SETOR DE TRANSPORTE?**

Artigo apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Carlos Eduardo Castilla Alvarez

LAVRAS – MG

2023

IGHOR FELIPE DE MELO QUEIROZ

LARA COTA TEIXEIRA

**VEÍCULOS ELÉTRICOS SÃO A MELHOR SOLUÇÃO PARA MITIGAÇÃO
DA EMISSÃO DE CO₂ NO SETOR DE TRANSPORTE?**

**ARE ELECTRIC VEHICLES THE BEST SOLUTION FOR MITIGATING CO₂
EMISSIONS IN THE TRANSPORTATION SECTOR?**

Artigo apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Mecânica para obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 02 de maio de 2023

Dr. Carlos Eduardo Castilla Alvarez – UFLA

Dr. Dimas Jose Rua Orozco - UFLA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Castilla Alvarez

LAVRAS – MG

2023

RESUMO

Com o objetivo de reduzir a emissão de gases poluentes, os países ao redor do mundo adotaram estratégias para atingir as metas globais de controle do aquecimento global. Um dos principais setores selecionados para se tornar mais sustentável é o setor de transportes, que se encaminha para descarbonização dos combustíveis, sendo uma das alternativas a eletrificação da frota. Por se tratar de um tema que evolui significativamente com o passar dos anos, é necessário que as informações sejam atualizadas frequentemente, sendo assim, este estudo propõe uma revisão de literatura de alguns pontos-chaves para verificar se os veículos elétricos apresentam a melhor solução e se o mercado está preparado para essa transformação, avaliando a emissão de CO₂ e o impacto na rede elétrica, principalmente de países que utilizam fontes renováveis sazonais. Este artigo também aborda um dos principais pontos para o sucesso ou não da tecnologia de veículos elétricos que são as políticas de incentivo. Por fim, o estudo apresenta a visão dos autores nos pontos analisados sobre a eletrificação ser a melhor solução para o Brasil. Ao fim da análise, é possível perceber que, apesar de os veículos elétricos serem uma alternativa promissora, no quesito ambiental, para a descarbonização do setor de transporte no Brasil, eles não devem ser a única solução pois exigem grandes investimentos em infraestrutura e a geração de energia elétrica está condicionada a variações climáticas que nem sempre são favoráveis.

PALAVRAS CHAVE: Crises Hídricas. Emissão de CO₂. Frota Veicular. Matriz Elétrica Brasileira. Veículos elétricos.

ABSTRACT

Aiming to reduce the emission of pollutant gases, countries around the world have adopted strategies to achieve global goals to control global warming. One of the main sectors selected to become more sustainable is the transportation sector, which is moving towards decarbonization of fuels, one of the alternatives being fleet electrification. Since this is a topic that evolves significantly over the years, it is necessary to have frequently updated information, thus, this study proposes a literature review of some key points to verify whether electric vehicles present the best solution and whether the market is prepared for this transformation, evaluating the emission of CO₂ and the impact on the electric grid, especially in countries that use seasonal renewable sources. This article also addresses one of the main points for the success or not of the electric vehicle technology, which are the incentive policies. Finally, the study presents the authors' view on the points analyzed about electrification being the best solution for Brazil. At the end of the analysis, it is possible to realize that, although electric vehicles are a promising alternative, in the environmental aspect, for the decarbonization of the transport sector in Brazil, they should not be the only solution because they require large investments in infrastructure and the generation of electric power is conditioned to climate variations that are not always favorable.

KEYWORDS: Brazilian Electric Matrix. CO₂ emissions. Electric Vehicles. Vehicle Fleet. Water Crisis.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	8
1. INTRODUÇÃO	8
2. REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1. EFEITO ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL	9
2.2. VEÍCULOS ELÉTRICOS X VEÍCULOS CONVENCIONAIS	10
2.3. MATRIZ ELÉTRICA	12
3. METODOLOGIA	13
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	14
REFERÊNCIAS	16
SEGUNDA PARTE – ARTIGO	18
ARTIGO 1 - VEÍCULOS ELÉTRICOS SÃO A MELHOR SOLUÇÃO PARA MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ NO SETOR DE TRANSPORTE?	18
1. INTRODUÇÃO	18
2. ANÁLISE E DISCUSSÕES	20
2.1 EMISSAO DE CO₂	20
2.2 MATRIZ ELÉTRICA DO BRASIL	25
2.3 IMPACTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NA REDE ELÉTRICA	27
2.4 POLÍTICAS DE INCENTIVOS	28
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
REFERÊNCIAS	31

PRIMEIRA PARTE

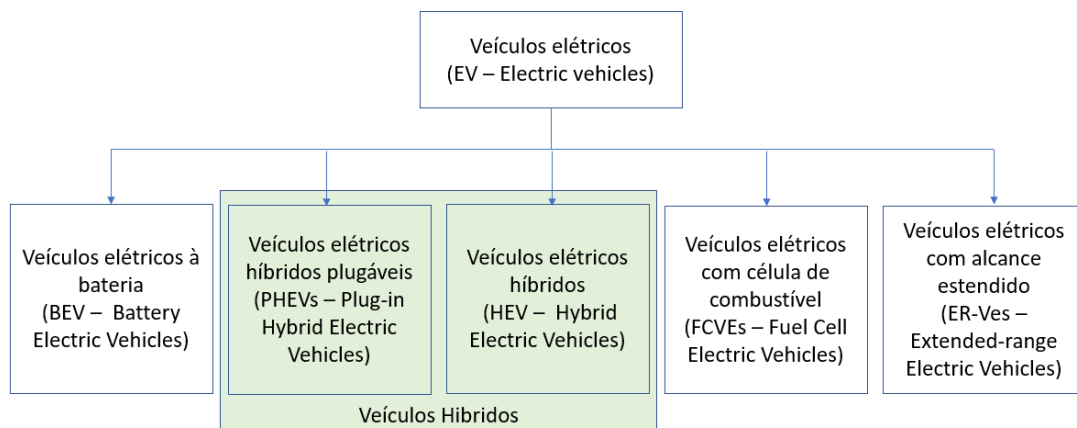
1. INTRODUÇÃO

De acordo com as Nações Unidas, “As mudanças climáticas são transformações a longo prazo nos padrões de temperatura e clima”, e tais mudanças ocorrem de forma natural, porém, a partir de 1800, o impacto humano tem apresentado aumentos significativos na temperatura do planeta [1]. Por se tratar de uma preocupação global, líderes mundiais e a ONU se reúnem na Conferência das Partes (COP – Conference of the Parties), para tomar decisões que mitiguem a elevação da temperatura. Uma das alternativas encontradas para solucionar a crescente preocupação com o aquecimento global é a reavaliação do setor de transporte, uma vez que ele é responsável por 20% do consumo de energia mundial e aproximadamente $\frac{1}{4}$ da emissão de CO₂. [2]

Uma das ações tidas como uma alternativa para reduzir a emissão de CO₂ do setor de transportes é a eletrificação dos veículos [3]. Os veículos elétricos são propulsionados por um motor elétrico e podem ser utilizados para qualquer tipo de transporte. Alguns modelos utilizam somente a energia proveniente da bateria enquanto outros combinam a energia de combustíveis com a energia elétrica armazenada em baterias [4]. Os veículos elétricos podem ser divididos em cinco categorias, que estão exemplificados na Figura 1:

- Veículos elétricos a bateria: São 100% movidos por energia elétrica, não possuem motor a combustão e geralmente possuem baterias maiores para aumentar a autonomia [5].
- Veículos elétricos híbridos plugáveis: São impulsionados por um motor de combustão convencional e um motor elétrico que possui carregamento externo [5].
- Veículos elétricos híbridos: São impulsionados por uma combinação entre o motor de combustão interna e o motor elétrico, a diferença para os plugáveis, é que não é possível recarregá-lo com uma fonte externa [5].
- Veículos elétricos com célula de combustível: Estes veículos apresentam um motor elétrico que utiliza uma mistura comprimida de hidrogênio e oxigênio obtido do ar, e apresentam como único resíduo água [5].
- Veículos elétricos com alcance estendido: São parecidos com os veículos elétricos à bateria, com a diferença de que possuem um motor de combustão interna responsável somente para recarregar a bateria [5].

Figura 1: Classificação dos veículos elétricos [5]



No Brasil, a Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE) divulgou que foram emplacados 49.245 veículos elétricos leves de quatro rodas em 2022, um crescimento de 41% na comparação com o ano anterior (34.990), com destaque para os veículos plugáveis. Este valor corresponde a aproximadamente 2,5% do total de carros emplacados no Brasil em 2022 [6]. Mesmo com evolução, a maior parte dos veículos elétricos emplacados em 2022, entre janeiro e novembro, foram os híbridos, que ainda são muito dependentes de combustíveis fósseis [7].

De acordo com os dados atuais, cresce o número de veículos elétricos existentes na frota veicular e, caso esta tendência continue, chegará um momento em que toda a frota será eletrificada. Um fator que pode se tornar uma limitação para essa futura mudança, é a disponibilidade de matéria prima para se produzir energia elétrica que atenda um crescimento excessivo (neste caso, gerado por uma substituição significativa dos carros de combustão interna) da demanda. Um país que vivencia crises hídricas periódicas [8] e possui como principal fonte da matriz Elétrica as usinas hidrelétricas, pode não suportar um setor de transporte inteiramente baseado em um recurso sazonal.

Outro fator a ser levantado é que, para manter operante a frota de veículos eletrificados, será necessária uma infraestrutura que suporte a elevada demanda, proporcionando recargas rápidas e fáceis, que incluem recarregar em casa e a criação de estações de carregamento que permitam carregamentos rápidos em longos trajetos [5]. Sendo assim, tem-se que os veículos elétricos são uma alternativa para reduzir a emissão de CO₂, mas é preciso avaliar se é uma alternativa passível de ser adotada em massa. O objetivo deste artigo é avaliar as ideias já existentes a respeito dos temas: veículos elétricos, a implantação na frota veicular brasileira e a capacidade de geração de eletricidade da matriz atual. A análise será dividida em quatro tópicos, sendo o primeiro acerca da emissão de CO₂, o segundo sobre a matriz elétrica do Brasil, seguido de como os veículos irão afetar a rede elétrica no tópico três e por último algumas políticas que podem quebrar barreiras para a aceitação dos veículos elétricos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

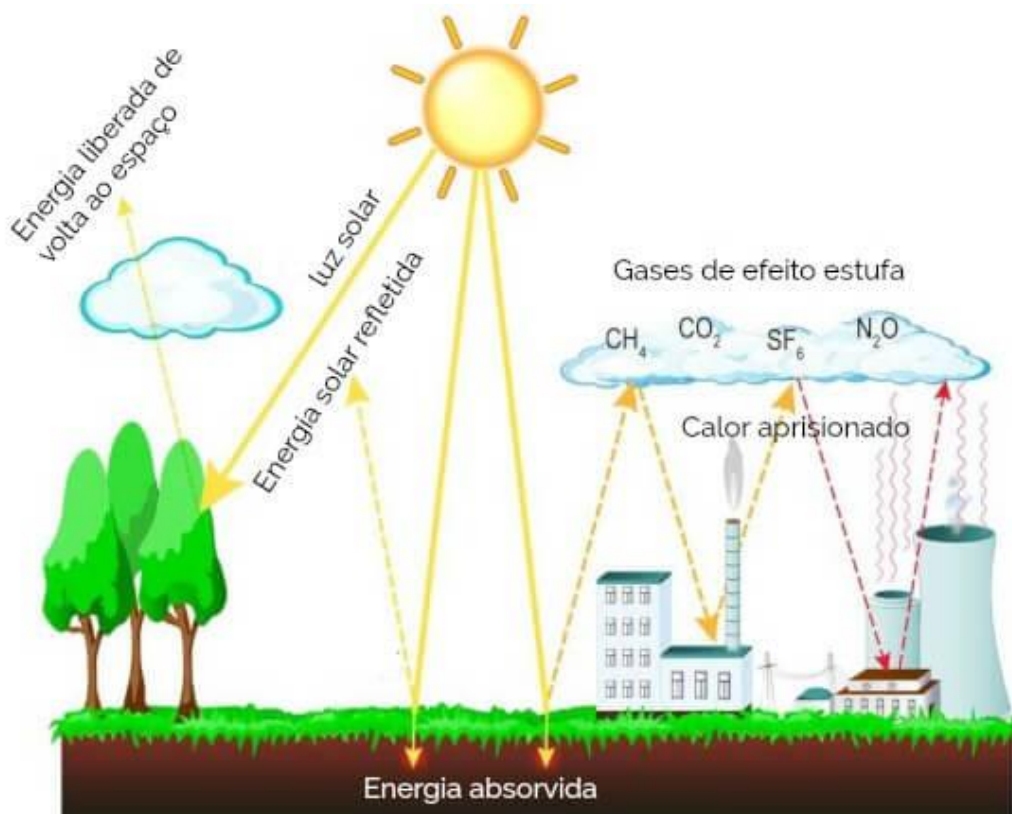
O referencial teórico será dividido em três seções, a primeira apresentando sobre o efeito estufa e aquecimento global, a segunda sobre veículos elétricos e veículos convencionais e a terceira sobre a matriz de eletricidade do Brasil.

2.1. EFEITO ESTUFA E AQUECIMENTO GLOBAL

O efeito estufa é um fenômeno natural ocasionado pela concentração de gases da atmosfera, os quais formam uma camada que permite a absorção de calor. Cada um dos gases é responsável por uma maneira de absorver e reemitir o calor, o que é chamado de aquecimento global [9]. A intensificação do efeito estufa tem como um dos resultados o agravamento do aquecimento global, que é o aumento da temperatura média do planeta além dos níveis naturais. Os efeitos negativos do aquecimento global são vistos diretamente no aumento da temperatura dos oceanos e ar, derretimento de calotas polares e aumento global do nível dos oceanos. Os principais gases do efeito estufa são vapor de água e CO₂, contudo, o vapor de água é pouco afetado por atividades humanas, o que não se aplica ao CO₂ e outros gases como CH₄, N₂O que também são considerados gases do efeito estufa. [10]

A Figura 2, demonstra de forma simplificada como ocorre o efeito estufa:

Figura 2: Representação efeito estufa [11]



O CO_2 é emitido principalmente pelo uso de combustíveis fósseis no setor de transporte, sendo assim, alternativas para descarbonização do setor estão sendo implementadas e, segundo [12], a eletrificação, uma das alternativas promissoras para os veículos, pode reduzir a emissão de gases do efeito estufa. Eletrificar o setor seria substituir os motores de combustão interna, por motores elétricos.

2.2. VEÍCULOS ELÉTRICOS X VEÍCULOS CONVENCIONAIS

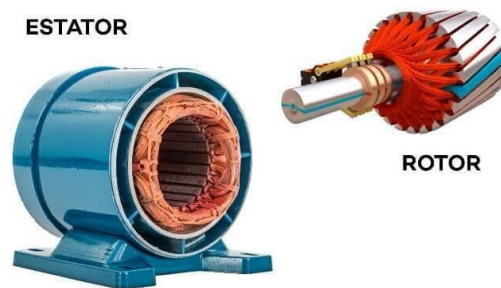
Os motores de combustão interna transformam a energia química do combustível em energia térmica e posteriormente em energia mecânica capaz de movimentar os veículos. Neste tipo de motor, os combustíveis majoritariamente utilizados são fontes fósseis provenientes do petróleo, neste processo um dos principais resíduos é o CO_2 e por se tratar de uma tecnologia amplamente difundida os números de emissão são expressivos. O motor mais utilizado é conhecido como motor de ciclo Otto [13]. Este modelo se aplica a motores de quatro tempos, sendo eles:

- 1º Tempo: Admissão isobárica
- 2º Tempo: Compressão adiabática
- 3º Tempo: Combustão isocórica seguido de expansão adiabática
- 4º Tempo: Escape da válvula seguido de exaustão isobárica

Por outro lado, os veículos elétricos utilizam a energia elétrica como fonte de energia, estes motores são alimentados por uma bateria. O motor elétrico é composto por um estator, a parte fixa, e um rotor, a parte móvel. O estator consiste em uma série de bobinas de fio de cobre enroladas em torno de um núcleo de ferro. Quando a corrente elétrica passa por essas bobinas um campo magnético ocorrerá. O rotor consiste em um eixo e uma série de ímãs permanentes alinhados com os enrolamentos do estator. Quando

uma corrente elétrica é aplicada às bobinas do estator, o campo magnético resultante gira o rotor, gerando o movimento necessário para impulsionar o veículo. Para controlar a velocidade e a direção do motor um controlador eletrônico é usado para regular a quantidade de corrente enviada ao motor. A fonte de alimentação de um motor elétrico geralmente é uma bateria de íon-lítio que nutre o motor. A Figura 3 demonstra o rotor e o estator utilizados em veículos elétricos.

Figura 3: Componentes motores elétricos [15]



Existem alguns tipos principais de baterias que podem ser encontrados, como as baterias de chumbo/ácido, na qual os eletrodos estão envolvidos em um catodo ácido, as baterias de íons de Lítio possuem uma das maiores densidades energéticas das tecnologias atuais. As novas gerações de bateria devem ser estudadas para buscar o percurso de maiores distâncias com uma carga de bateria. Novos tipos de bateria vêm sendo estudados, como Lítio-enxofre ou íons de magnésio, porém, apesar de terem maior densidade energética, possuem problemas de segurança ou poucas ciclagens, sendo inviáveis para os veículos elétricos. e as baterias a base de zinco, que apresentam maior segurança se comparada com as outras duas e são capazes de armazenar uma quantidade de energia próxima as baterias de íon-lítio. Outro tipo muito comum é a bateria níquel-hidreto metálico (NiHM) possui alta densidade de energia e alta capacidade da bateria. Possui alta resistência à oxidação e um número grande de ciclos de carga e descarga. [16]

Além dos motores elétricos serem mais simples que os motores de combustão interna, eles também são mais eficientes, em média, motores convencionais possuem eficiência menor do que 40% enquanto os elétricos apresentam uma eficiência média 85% [17].

Um ponto negativo para os veículos elétricos, é o custo inicial necessário para adquirir um automóvel com esta tecnologia. Para avaliar este investimento, é comum se utilizar do cálculo de “Payback”, que avalia o tempo em que o dinheiro investido seria retornado. A Equação 1, demonstra como calcular o “Payback” simples:

$$\text{Payback simples} = \text{capital inicial investido} \div \text{fluxo de caixa médio} \quad (1)$$

Já o cálculo do “Payback” descontado que leva em consideração o fator tempo é demonstrada na Equação 2:

$$PV = FV / (1 + I)^N \quad (2)$$

Na qual

- PV = valor descontado;
- FV = valor futuro;

- I = taxa de desconto;
- N = período

Considerando que o tempo médio que o brasileiro troca de carro é menor que dois anos [18], um “*Payback*” curto torna o produto mais interessante. Esta análise se aplica para situação financeira, mas, o propósito dos veículos elétricos é apresentar uma solução mais sustentável, reduzindo a emissão de gases do efeito estufa.

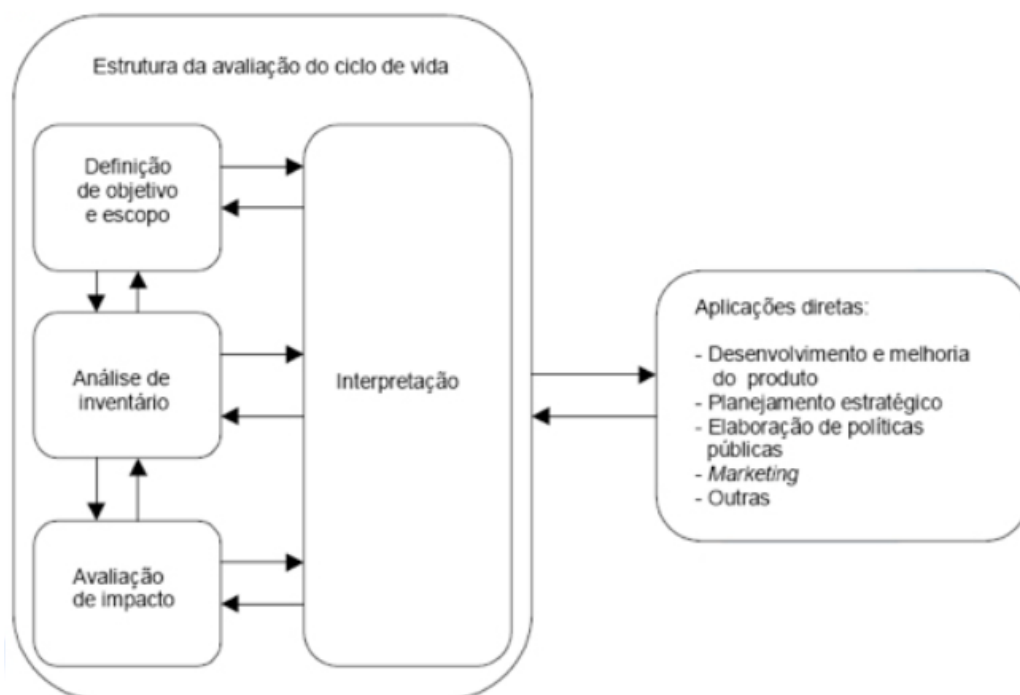
Existem diversas formas de calcular a emissão de CO₂ de um produto, dentre elas a mais utilizada é a avaliação do ciclo de vida “ACV”. Este tipo de análise busca analisar o impacto ambiental de um determinado produto desde o começo da sua vida, partindo da extração dos matérias até o final de sua vida que é o descarte e reciclagem. [19]

Contudo, este tipo de análise pode ser dividido em sub etapas, que, em alguns casos, são adotados pelos autores a fim de entender o impacto ambiental de determinado momento da vida. As etapas podem ser classificadas em:

- Fase de manufatura: Produção do veículo;
- Fase operacional: Fase de utilização do veículo e manutenção;
- Fim da vida: Descarte e reciclagem

Para o caso de veículos elétricos, a fase de produção pode ser mais poluente do que a fase operacional dependendo do mix de energia do país. A Figura 4 representa de as etapas da ACV:

Figura 4: Etapas ACV[20]



2.3. MATRIZ ELÉTRICA

A matriz Elétrica de um país trata de quais fontes são usadas na geração de eletricidade. Essas fontes podem ser renováveis, que utilizam fontes que podem ser usadas e aproveitadas por muito tempo sem se esgotar, ou não renováveis, que usam

recursos limitados no planeta. Fontes renováveis são, por exemplo, hídricas, eólicas e solar. Fontes não renováveis são petróleo, carvão e nuclear.

No mundo, a matriz elétrica é em grande parte não renovável, como é possível ver na Figura 5 e, no Brasil, mais de 80% da matriz é de fontes renováveis (principalmente hídricas), como é possível ser visto na Figura 6:

Figura 5: Matriz elétrica mundial [21]

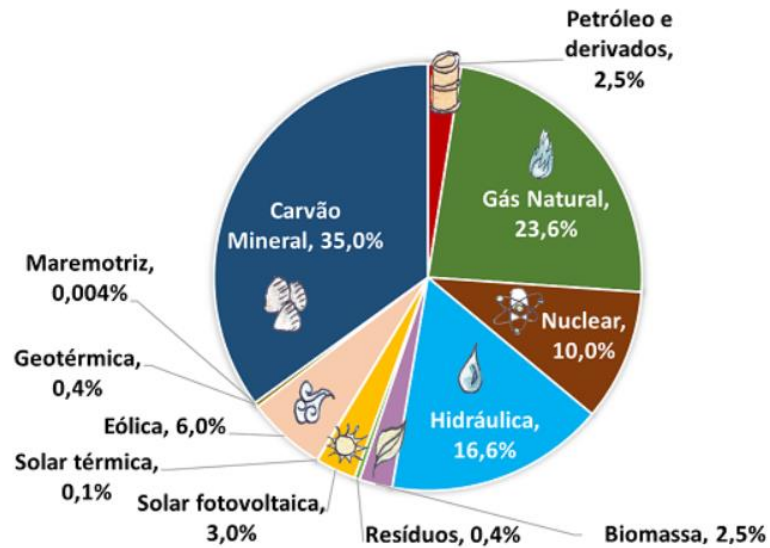
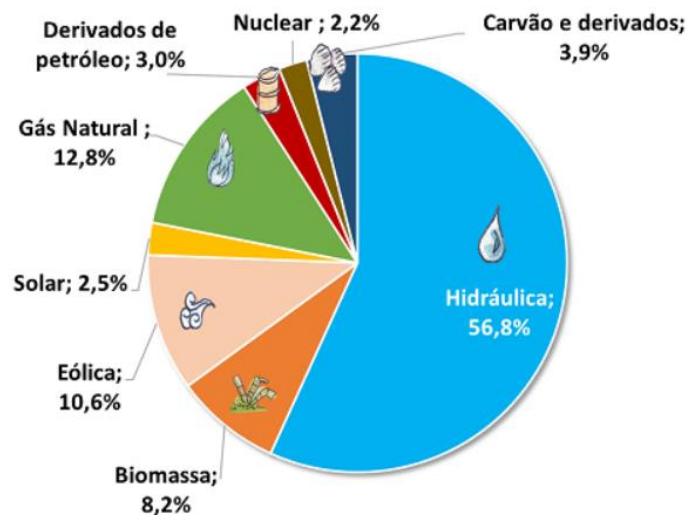


Figura 6: Matriz elétrica brasileira [21]



Na próxima seção será apresentada a metodologia e ficará mais claro o motivo de ter sido escolhido estes tópicos para análise.

3. METODOLOGIA

Para atingir o objetivo principal deste trabalho, o de responder à pergunta: “VEÍCULOS ELÉTRICOS SÃO A MELHOR SOLUÇÃO PARA MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ NO SETOR DE TRANSPORTE?”, a metodologia adotada será a de

revisão bibliográfica. As pesquisas serão realizadas buscando artigos em inglês em revistas com Qualis B1 ou superior que apresentem palavras chaves como “Brazilian electric matrix”, “Electric vehicles”, “Energy demand”, “Fleet projection” e “GHG emission”.

Os pontos analisados para tecer uma conclusão acerca do tema serão:

- Emissão de CO₂;
- Matriz elétrica do Brasil;
- Impacto da implementação dos veículos elétricos na rede elétrica;
- Políticas de incentivo.

Após a leitura de artigos que abordem os temas de interesse, será possível tecer uma conclusão a respeito da pergunta inicial.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As preocupações a respeito do clima já datam de muitos anos, sendo assim, diversas atitudes foram tomadas para minimizar o impacto humano no meio ambiente. Para este estudo em questão, a tecnologia analisada para mitigar a emissão de CO₂ foi a de eletrificar o setor de transporte, em particular os veículos leves.

Analisando a emissão de poluentes, os veículos elétricos demonstram uma solução para reduzir a emissão de gases do efeito estufa quando comparados com tecnologia dos motores de combustão interna. Os resultados positivos se potencializam quando as fontes de geração de energia são majoritariamente renováveis, como é o caso do Brasil. Em contrapartida, os níveis de toxicidade para os humanos podem aumentar com os veículos elétricos pelo alto uso de metais, químicos e energia para a produção das baterias. Contudo, no Brasil, devido a matriz de energia, os impactos ambientais como formação de oxidantes fotoquímicos, acidificação oceânica, eutrofização, a tecnologia utilizando veículos elétricos à bateria apresentam bons resultados no Brasil.

Mesmo com o aspecto positivo para mitigar a emissão de poluentes, a implementação de veículos elétricos causará impactos nas redes elétricas. Apesar dos motores elétricos necessitarem de menos energia do que os motores de combustão interna, uma alta penetração dessa tecnologia pode criar um desequilíbrio entre a oferta e demanda de energia. Neste cenário, são necessárias estratégias para evitar picos de consumo de energia ou aumentar a geração de energia. Planejar os horários de carregamento dos veículos é uma adaptação necessária que, além de benéfica para a rede elétrica, será também benéfica para os consumidores.

Sabendo-se que, a eletrificação do setor de transporte é uma alternativa viável para a mitigação da emissão de gases do efeito estufa, uma das barreiras para implementação desta tecnologia será a aceitação dos consumidores, uma vez que os veículos elétricos necessitam de um investimento inicial maior do que os veículos convencionais. Para resolver este problema, incentivos financeiros, isenções fiscais e outros benefícios proporcionados pelos governos tornam-se um ponto chave para o sucesso da eletrificação da frota veicular. Dentre estes benefícios, a redução de impostos pagos e as estruturas de carregamento são grandes contribuidores para a adaptação dos veículos elétricos. As políticas de incentivo são uma ferramenta importante para promover a adoção de carros elétricos, mas também é necessário um compromisso a longo prazo com a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis para garantir que os carros elétricos sejam uma opção cada vez mais limpa e sustentável no futuro.

Com o objetivo de atingir as metas do acordo de Paris para reduzir a emissão de gases do efeito estufa, a estratégia de utilização de veículos elétricos no setor de transporte atingirá os níveis desejados de emissão no Brasil, visto que a matriz elétrica do país é majoritariamente renovável e caminha para cada vez mais apresentar uma distribuição proporcional das fontes de geração para que em períodos de seca seja possível compensar com fonte eólicas ou solares. Contudo, esta abordagem precisa ser acompanhada de outras tecnologias como substituição dos combustíveis derivados do petróleo por biocombustíveis., os resultados podem ser potencializados se forem combinados em veículos híbridos, em especial no Brasil, que apresenta grande vocação para produção e uso de bioenergia.

REFERÊNCIAS

- [1] Nações Unidas Brasil, “O que são mudanças climáticas?,” Feb. 13, 2023. <https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-sao-mudancas-climaticas#:~:text=Sobre%20a%20campanha-,As%20mudan%C3%A7as%20clim%C3%A1ticas%20s%C3%A3o%20transforma%C3%A7%C3%B5es%20a%20longo%20prazo%20nos%20padr%C3%B5es,de%20varia%C3%A7%C3%B5es%20no%20ciclo%20sola> (accessed Feb. 23, 2023).
- [2] G. Kalghatgi, “Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport?,” *Applied Energy*, vol. 225. Elsevier Ltd, pp. 965–974, Sep. 01, 2018. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.076.
- [3] E. Figenbaum, “Perspectives on Norway’s supercharged electric vehicle policy,” *Environ Innov Soc Transit*, vol. 25, pp. 14–34, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.eist.2016.11.002.
- [4] K. Roberto, R. Stahelin, and M. Pauli, “UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA,” 2021.
- [5] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, “A review on electric vehicles: Technologies and challenges,” *Smart Cities*, vol. 4, no. 1. MDPI, pp. 372–404, Mar. 01, 2021. doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [6] E. Jordão and A. Kakuta, “Em ano de recordes, veículos plug-in avançam,” <http://www.abve.org.br/em-ano-de-recordes-veiculos-plug-in-ganham-mercado/>, Feb. 13, 2023.
- [7] M. Buranelli de Oliveira, H. Moretti Ribeiro da Silva, D. Jugend, P. de Camargo Fiorini, and C. E. Paro, “Factors influencing the intention to use electric cars in Brazil,” *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 155, pp. 418–433, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.tra.2021.11.018.
- [8] R. Baran and L. F. L. Legey, “The introduction of electric vehicles in Brazil: Impacts on oil and electricity consumption,” *Technol Forecast Soc Change*, vol. 80, no. 5, pp. 907–917, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.techfore.2012.10.024.
- [9] C. S. Snyder, T. W. Bruulsema, T. L. Jensen, and P. E. Fixen, “Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects,” *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 133, no. 3–4. pp. 247–266, Oct. 2009. doi: 10.1016/j.agee.2009.04.021.
- [10] R. Alley *et al.*, “INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE Climate Change 2007: The Physical Science Basis Summary for Policymakers Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers IPCC WGI Fourth Assessment Report.”
- [11] Brasil Escola, “Efeito estufa,” <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/efeito-estufa.htm>, Mar. 08, 2023.
- [12] E. Talebizadeh, M. Rashidinejad, and A. Abdollahi, “Evaluation of plug-in electric vehicles impact on cost-based unit commitment,” *J Power Sources*, vol. 248, pp. 545–552, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.09.009.
- [13] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *termodinâmica*, 7th ed. AMGH, 2013.

- [15] NeoCharge, “COMO FUNCIONA O MOTOR DE UM CARRO ELÉTRICO,” <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/motor-como-funciona>, Mar. 08, 2023.
- [16] Marcelo Henrique de Azevedo, “Carros elétricos: viabilidade econômica e ambiental de inserção competitiva no mercado brasileiro,” Ouro Preto, Dec. 2018.
- [17] Gustavo Henrique Ruffo, “O drama dos motores a combustão - Por que todo mundo já admite que o futuro é elétrico,” <https://www.kbb.com.br/detalhes-noticia/drama-motor-combustao-eficiencia/?ID=124#:~:text=Um%20motor%20el%C3%A9trico%20tem%20efici%C3%Aancia,muito%20mais%20energia%20em%20movimento.>, Oct. 17, 2017.
- [18] Camila F. de Mendonça, “Como saber se é a hora certa de trocar de carro?,” <https://www.infomoney.com.br/mercados/como-saber-se-e-a-hora-certa-de-trocar-de-carro/>, Mar. 08, 2023.
- [19] ACV Brasil, “Avaliação do Ciclo de Vida (ACV),” <https://acvbrasil.com.br/consulting/life-cycle-assessment-lca>, Mar. 08, 2023.
- [20] Revista Espacios, “Aplicação e utilização da Análise do Ciclo de Vida na indústria,” <https://www.revistaespacios.com/a11v32n04/113204132.html>, Mar. 08, 2023.
- [21] Empresa de Pesquisa Energética, “Matriz Energética e Elétrica,” <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#TOPO>, Feb. 13, 2023.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

ARTIGO 1 - VEÍCULOS ELÉTRICOS SÃO A MELHOR SOLUÇÃO PARA MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ NO SETOR DE TRANSPORTE?

VEÍCULOS ELÉTRICOS SÃO A MELHOR SOLUÇÃO PARA MITIGAÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂ NO SETOR DE TRANSPORTE?

Ighor Felipe de Melo Queiroz¹

Lara Cota Teixeira¹

¹ Universidade federal de Lavras, Trevo Rotatório Professor Edmir Sá Santos
Universidade Federal de, Lavras - MG, 37203-202

RESUMO

Com o objetivo de reduzir a emissão de gases poluentes, os países ao redor do mundo adotaram estratégias para atingir as metas globais de controle do aquecimento global. Um dos principais setores selecionados para se tornar mais sustentável é o setor de transportes, que se encaminha para descarbonização dos combustíveis, sendo uma das alternativas a eletrificação da frota. Por se tratar de um tema que evolui significativamente com o passar dos anos, é necessário que as informações sejam atualizadas frequentemente, sendo assim, este estudo propõe uma revisão de literatura de alguns pontos-chaves para verificar se os veículos elétricos apresentam a melhor solução e se o mercado está preparado para essa transformação, avaliando a emissão de CO₂ e o impacto na rede elétrica, principalmente de países que utilizam fontes renováveis sazonais. Este artigo também aborda um dos principais pontos para o sucesso ou não da tecnologia de veículos elétricos que são as políticas de incentivo. Por fim, o estudo apresenta a visão dos autores nos pontos analisados sobre a eletrificação ser a melhor solução para o Brasil. Ao fim da análise, é possível perceber que, apesar de os veículos elétricos serem uma alternativa promissora, no quesito ambiental, para a descarbonização do setor de transporte no Brasil, eles não devem ser a única solução pois exigem grandes investimentos em infraestrutura e a geração de energia elétrica está condicionada a variações climáticas que nem sempre são favoráveis.

PALAVRAS CHAVE: Crises Hídricas. Emissão de CO₂. Frota Veicular. Matriz Elétrica Brasileira. Veículos elétricos.

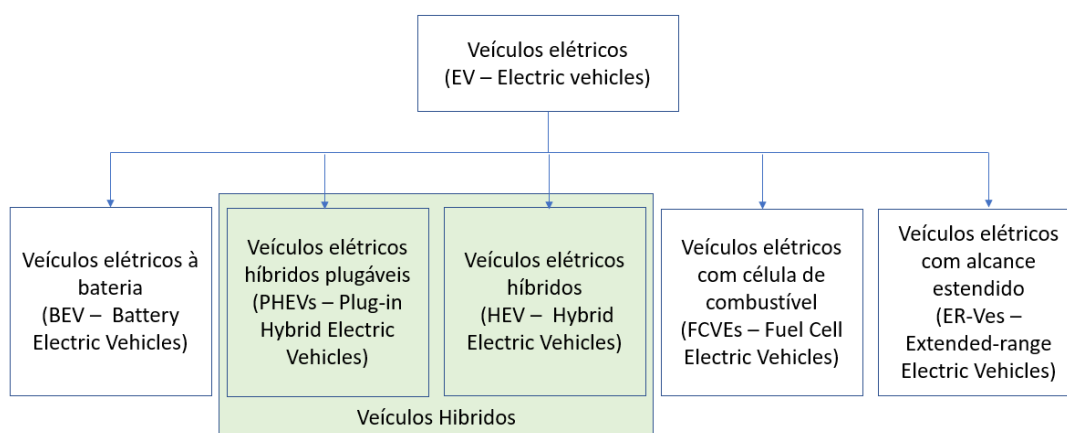
1. INTRODUÇÃO

De acordo com as Nações Unidas, “As mudanças climáticas são transformações a longo prazo nos padrões de temperatura e clima”, e tais mudanças ocorrem de forma natural, porém, a partir de 1800, o impacto humano tem apresentado aumentos significativos na temperatura do planeta [1]. Por se tratar de uma preocupação global, líderes mundiais e a ONU se reúnem na Conferência das Partes (COP – Conference of the Parties), para tomar decisões que mitiguem a elevação da temperatura. Uma das alternativas encontradas para solucionar a crescente preocupação com o aquecimento global é a reavaliação do setor de transporte, uma vez que ele é responsável por 20% do consumo de energia mundial e aproximadamente ¼ da emissão de CO₂. [2]

Uma das ações tidas como uma alternativa para reduzir a emissão de CO₂ do setor de transportes é a eletrificação dos veículos [3]. Os veículos elétricos são propulsionados por um motor elétrico e podem ser utilizados para qualquer tipo de transporte. Alguns modelos utilizam somente a energia proveniente da bateria enquanto outros combinam a energia de combustíveis com a energia elétrica armazenada em baterias [4]. Os veículos elétricos podem ser divididos em cinco categorias, que estão exemplificados na Figura 1:

- Veículos elétricos a bateria: São 100% movidos por energia elétrica, não possuem motor a combustão e geralmente possuem baterias maiores para aumentar a autonomia [5].
- Veículos elétricos híbridos plugáveis: São impulsionados por um motor de combustão convencional e um motor elétrico que possui carregamento externo [5].
- Veículos elétricos híbridos: São impulsionados por uma combinação entre o motor de combustão interna e o motor elétrico, a diferença para os plugáveis, é que não é possível recarregá-lo com uma fonte externa [5].
- Veículos elétricos com célula de combustível: Estes veículos apresentam um motor elétrico que utiliza uma mistura comprimida de hidrogênio oxigênio obtido do ar, e apresentam como único resíduo água [5].
- Veículos elétricos com alcance estendido: São parecidos com os veículos elétricos à bateria, com a diferença de que possuem um motor de combustão interna responsável somente para recarregar a bateria [5].

Figura 3: Classificação dos veículos elétricos [5]



No Brasil, a Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE) divulgou que foram emplacados 49.245 veículos elétricos leves de quatro rodas em 2022, um crescimento de 41% na comparação com o ano anterior (34.990), com destaque para os veículos plugáveis. Este valor corresponde a aproximadamente 2,5% do total de carros emplacados no Brasil em 2022 [6]. Mesmo com evolução, a maior parte dos veículos elétricos emplacados em 2022, entre janeiro e novembro, foram os híbridos, que ainda são muito dependentes de combustíveis fósseis [7].

De acordo com os dados atuais, cresce o número de veículos elétricos existentes na frota veicular e, caso esta tendência continue, chegará um momento em que toda a frota será eletrificada. Um fator que pode se tornar uma limitação para essa futura mudança, é a disponibilidade de matéria prima para se produzir energia elétrica que atenda um

crescimento excessivo (neste caso, gerado por uma substituição significativa dos carros de combustão interna) da demanda. Um país que vivencia crises hídricas periódicas [8] e possui como principal fonte da matriz Elétrica as usinas hidrelétricas, pode não suportar um setor de transporte inteiramente baseado em um recurso sazonal.

Outro fator a ser levantado é que, para manter operante a frota de veículos eletrificados, será necessária uma infraestrutura que suporte a elevada demanda, proporcionando recargas rápidas e fáceis, que incluem recarregar em casa e a criação de estações de carregamento que permitam carregamentos rápidos em longos trajetos [5]. Sendo assim, tem-se que os veículos elétricos são uma alternativa para reduzir a emissão de CO₂, mas é preciso avaliar se é uma alternativa passível de ser adotada em massa. O objetivo deste artigo é avaliar as ideias já existentes a respeito dos temas: veículos elétricos, a implantação na frota veicular brasileira e a capacidade de geração de eletricidade da matriz atual. A análise será dividida em quatro tópicos, sendo o primeiro acerca da emissão de CO₂, o segundo sobre a matriz elétrica do Brasil, seguido de como os veículos irão afetar a rede elétrica no tópico três e por último algumas políticas que podem quebrar barreiras para a aceitação dos veículos elétricos.

2. ANÁLISE E DISCUSSÕES

Com o avançar das tecnologias é comum que o mundo caminhe para soluções com menor impacto ambiental, existem algumas estratégias para a descarbonização do setor, como por exemplo utilização de biocombustíveis e veículos elétricos. Neste artigo, a solução analisada é a dos veículos elétricos, que buscam uma alternativa para mitigar a emissão de CO₂ do setor de transporte.

Apesar de apresentar uma proposta promissora, existem alguns impactos negativos e barreiras que podem dificultar a implementação da eletrificação da frota, dentre elas, o aumento da demanda de energia. Neste cenário, seria necessário analisar os impactos na rede e na matriz elétrica, para identificar se seria possível suprir o aumento da demanda e se este aumento não aumentaria emissão de CO₂, pois a emissão de gases do efeito estufa na geração de energia está diretamente ligada as fontes de geração serem renováveis ou não.

Além disso, os principais responsáveis para que a tecnologia apresente os resultados esperados serão os consumidores, dessa forma, tornar o produto mais atrativo pode ser um dos pontos chaves para aumentar a aceitação dos veículos elétricos, nesta perspectiva o governo se torna o responsável por garantir incentivos e benefícios para as pessoas que comprarem e utilizarem veículos elétricos. Ao pensar na inserção desses veículos na frota, os responsáveis pelo gerenciamento de energia ocupam um papel importante para que a rede elétrica não entre em colapso com a nova tecnologia.

2.1 EMISSAO DE CO₂

Os veículos elétricos são tidos popularmente como “zero emissão” ao serem comparados com os veículos movidos por motores de combustão interna (MCI) no assunto emissão de gases do efeito estufa. Para avaliar a emissão de CO₂ de um produto, existem diversas metodologias que precisam de algumas considerações e isso pode impossibilitar uma comparação direta [9].

Com base nos resultados da última década, os autores Rietmann et al. [10] foram capazes de prever a frota de veículos elétricos e a emissão de CO₂ durante a fase de uso do veículo em 26 países diferentes ao redor do mundo. As previsões apontaram que em média 30% dos veículos serão elétricos até 2032 e, além disso, com esse avanço, a redução da emissão de CO₂ será atingida contanto que os países invistam em fontes renováveis de energia; com o mix de geração atual a tendência é que a emissão de CO₂ cresça até 2035 mesmo que a frota seja 50% elétrica.

Já no Brasil, um estudo realizado no interior de Minas Gerais [9], utilizando o software AVL Cruise [11] realizou uma simulação que retornava a emissão de CO₂ do veículo MCI e a emissão do mesmo gás para a geração de energia necessária para abastecer o veículo elétrico em uma frota de táxis. Utilizando o modelo padrão de circulação da Europa, NEDC, o veículo percorria 11.023 km em 1180s com uma velocidade média de 33,6 km/h. Neste estudo, considerando uma matriz Elétrica baseada em fontes renováveis, os veículos elétricos emitem até 10 vezes menos CO₂ que os motores de combustão interna, em um período de 15 anos. Sendo capaz de reduzir até 5600 toneladas de CO₂ por ano, no caso de substituição de uma frota de 213 táxis.

Existem outras formas de calcular a emissão de CO₂ e para avaliar o impacto total de uma nova tecnologia, é mais adequado que se utilize uma abordagem do ciclo de vida baseada na frota [12]. Esta abordagem tem sido mais utilizada no setor de transporte e permite avaliar um conjunto de produtos ao invés de um produto individual [13]. Os autores Woo et al.[14] conseguiram estimar a emissão de CO₂ para veículos movidos a bateria em quatro categorias diferentes: subcompacto, compacto, veículos de luxo e SUV. Levou-se em consideração a geração de energia no Brasil e foi realizada uma análise do poço à roda, encontrando as seguintes emissões médias:

- Subcompacto 16.6 gCO_{2eq}/km
- Compacto 14.4 gCO_{2eq}/km
- Veículo de luxo: 21.1 gCO_{2eq}/km
- SUV: 24.1 gCO_{2eq}/km

Diferentemente de Woo et al. [14], Benvenuti e Campos [13] não avaliaram a emissão de diferentes categorias de veículos, mas sim para diferentes cenários e três estratégias de mitigação de CO₂ diferentes, sendo elas:

- (I) Melhorias na eficiência do combustível;
- (II) Aumento da utilização de biocombustível;
- (III) Difusão dos veículos elétricos.

Os cenários 1, 2 e 3, presentes na tabela 1 apresentam uma evolução nos níveis de difusão dos veículos elétricos, diferentes razões da utilização de bioetanol e gasolina e menos emissão de gases da frota de veículos, sendo o terceiro cenário o que apresenta a abordagem mais agressiva e o primeiro mais próximo do cenário em comparação. Por exemplo, o cenário 1 possui poucas mudanças nos três aspectos, e o terceiro cenário possui uma mudança expressiva. Os autores consideraram somente o período de utilização do veículo (tank-to-wheel, TTW), além de um curto período de vida. Apesar destas limitações, os autores conseguem identificar que sem a implementação de medidas

para reduzir a emissão de gases do efeito estufa, as métricas determinadas pelo acordo de Paris não serão atingidas.

Tabela 1: Cenários estudo Benvenuti e Campos [13]

ESTRATÉGIA DE MITIGAÇÃO	SEM MUDANÇA ATÉ 2040	CENÁRIO 01 (%)	CENÁRIO 02 (%)	CENÁRIO 03 (%)
Melhoria da eficiência da bateria	Sem novas políticas de redução de emissão de CO ₂	140g/km em 2020	118g/km em 2025	95g/km em 2031
Aumento do biocombustível	45% razão da utilização de biocombustível/gasolina	45% + 5% por ano	45% + 10% por ano	45% + 15% por ano
Difusão de veículos elétricos (BEV)	Ocorre de forma modesta	Ocorre de forma agressiva	A partir de 2020, 10% do mercado por ano	A partir de 2020, 20% do mercado por ano

Realizando uma comparação entre os cenários com o cenário sem mudanças em 2040, é estimado que a frota de veículos leves brasileira emita 110g/km, sem novas políticas de mitigação de CO₂. Com a utilização de 45% de bioetanol em relação à gasolina, os autores obtiveram as maiores mitigações com o aumento do uso de biocombustíveis, seguidos pela melhoria na eficiência dos combustíveis e depois pela difusão dos veículos elétricos, como é possível ver na Tabela 2 [13].

Tabela 2: Redução da emissão de gases do efeito estufa com relação ao cenário sem mudanças.[13]

ESTRATÉGIA DE MITIGAÇÃO	CENÁRIO 01 (%)	CENÁRIO 02 (%)	CENÁRIO 03 (%)
Melhoria da eficiência da bateria	17	26	37
Aumento do biocombustível	21	33	47
Difusão de veículos elétricos (BEV)	1	5	12
Total	39	64	96

O impacto de determinada atividade pode ser realizado avaliando o ciclo de vida (Avaliação do ciclo de vida ou ACL) que permite avaliar as etapas desde a coleta do material bruto, até o descarte no fim da vida útil do produto [15]. Por se tratar de uma metodologia difundida e bem consolidada, o ACL é capaz de retornar resultados que podem auxiliar nas tomadas de decisões de legisladores e governantes [16].

Para realizar uma avaliação do ciclo de vida de um veículo elétrico, as etapas com maior peso de emissão de CO₂ são as da manufatura da bateria e a produção de energia elétrica [17], [18]. Também é possível afirmar que em países com geração de energia renovável, a etapa mais impactante é a produção da bateria enquanto em países que dependem de fontes fósseis a fase de circulação é a que mais impacta, para baterias do tipo LiFePO₄, a produção e descarte apresenta menos de 20000 kgCO₂eq, enquanto a fase de utilização consome, na China, que possui a maioria da sua geração de energia proveniente de carvão de baixa qualidade, mais de 80000 kgCO₂eq (incluindo a produção e descarte), em contraste a este cenário, a França que possui geração de energia de fontes nucleares e renováveis, a emissão de CO₂ equivalente na soma das fases é de pouco mais que os 20000 kgCO₂eq [19]. Na literatura, a fase de produção da bateria, apresenta uma grande incerteza, já que os valores encontrados apresentam uma variação entre 30-210 kgCO₂eq/kWh [20].

Existem diversos estudos de ACV conduzidos no Brasil, como o estudo de Choma e Ugaya [21], que identificaram o impacto ambiental de veículos elétricos (BEV) na frota de veículos leves do Brasil. Lopes Silva et al [22] analisaram do início ao fim as válvulas de exaustão produzidas no Brasil. Além disso, existem estudos em outras regiões como Estados Unidos, Europa, China, que analisam o veículo por completo, utilizando ACV

[23], [24]. Para conduzir uma análise completa do ciclo de vida, de Souza et al. analisaram as formas convencionais de combustível e a opção alternativa utilizando eletricidade [25].

A Tabela 3, apresenta um resumo das informações e cenários considerados presentes no estudo feito por Souza et al. [25]

Tabela 3: Considerações dos autores [25]

CENÁRIOS	INFORMAÇÕES DO SISTEMA
1: Veículo com motor de combustão interna abastecido com gasolina	Gasolina C (73% gasolina pura + 27% etanol anidro)
2: Veículo com motor de combustão interna abastecido com etanol + gasolina	56,25% gasolina + 43,75% etanol
3: Veículo com motor de combustão interna abastecido com etanol	100% etanol
4: Veículo híbrido plugável (motor de combustão interna + motor elétrico)	Autonomia de 80km somente com o motor elétrico
5: Veículo apenas com motor elétrico	Autonomia de 160km

Os valores encontrados referente ao potencial de aquecimento global se organizam de forma que o Cenário 1 é o mais preocupante e o cenário 3 menos perigoso, conforme a Tabela 4. O potencial de aquecimento global está diretamente ligado o consumo de combustíveis fósseis, sendo assim, os cenários seguem a mesma sequência:

Tabela 4: Resultados obtidos por de SOUZA et al.[25]

CENÁRIO	GWP (kg CO₂EQ./km)
1	2,91 x 10 ⁻¹
2	2,65 x 10 ⁻¹
3	9,72 x 10 ⁻²
4	2,42 x 10 ⁻¹
5	1,51 x 10 ⁻¹

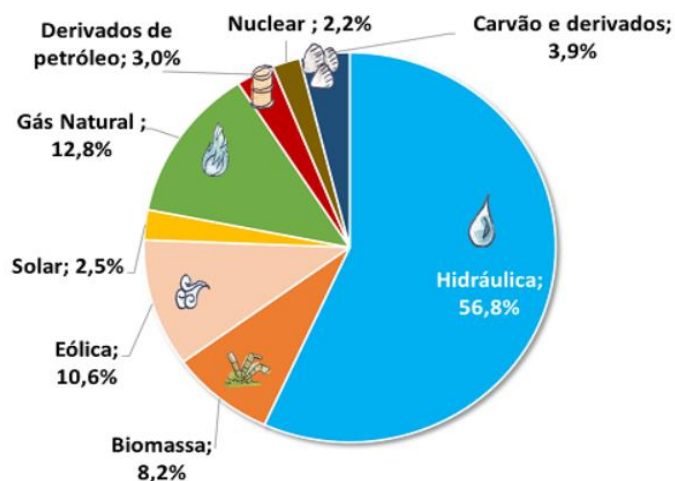
Com o caminhar do setor de transporte em direção a descarbonização dos combustíveis, a partir do estudo [25] é possível ver que os combustíveis fósseis precisam evoluir no quesito de serem menos poluentes para não se tornarem uma tecnologia obsoleta no futuro. Além disso, os biocombustíveis como o etanol, demonstram que este tipo de combustível possui resultados promissores atingir as metas de redução de emissão de CO₂. Os veículos com motores elétricos apresentam os resultados mais próximos dos biocombustíveis [25], ambos com menor potencial de aquecimento global do que veículos que utilizam gasolina, ou até mesmo motores flex que permitem a combinação de gasolina e etanol. Os veículos híbridos, podem ser uma solução para ser explorada a curto prazo mais viável do ponto de vista da emissão de CO₂ dos que os veículos elétricos, principalmente em país com grande potencial de biocombustíveis [26].

Os veículos elétricos possuem benefícios em relação ao potencial de aquecimento global pois durante a fase de uso não emitem gases poluentes diretamente, mas, emitem durante a sua manufatura e indiretamente quando recarregam suas baterias. No Brasil, por se tratar de uma matriz predominantemente renovável a emissão de gases do efeito estufa é menor se comparada com países como a China que possuem como principal fonte de geração de energia o carvão.

2.2 MATRIZ ELÉTRICA DO BRASIL

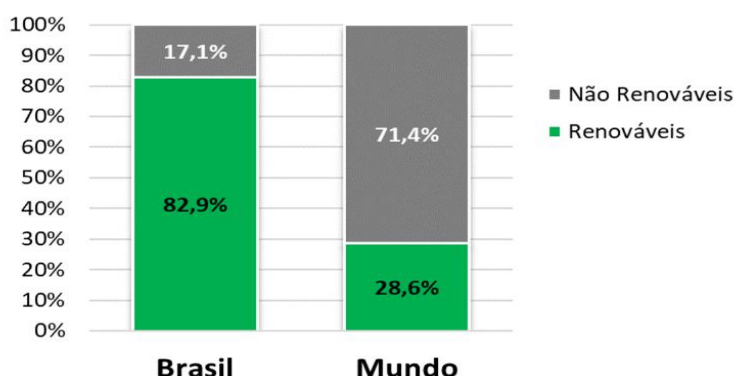
A matriz elétrica do Brasil é em sua maioria composta por energia renováveis, sendo a maior parte da potência gerada proveniente de usinas hidrelétricas. Este tipo de geração de energia acaba sendo mais vulnerável a mudanças climáticas do que as fontes que utilizam combustíveis fósseis. [27] Segundo a empresa de pesquisa energética (EPE) a matriz elétrica do Brasil está distribuída conforme a Figura 2:

Figura 4: Matriz elétrica brasileira em 2022. [28]



Nessa composição, aproximadamente 83% da geração de energia elétrica brasileira é proveniente de fontes renováveis. Esta proporção se destoa muito quando comparada ao restante do mundo, que apresenta menos e 30% de fontes renováveis, conforme pode ser visto na Figura 3:

Figura 5: Utilização de fontes renováveis e não renováveis para Brasil e no mundo em 2020.[28]



As fontes renováveis brasileiras são majoritariamente hidráulicas. Historicamente, alguns eventos podem servir como alerta para os efeitos das variações climáticas na geração de energia por hidrelétricas. Na África, um período de seca causou interrupção na geração de energia. Na Tanzânia, em 2006, houve um racionamento de eletricidade, pois as hidrelétricas funcionaram com apenas 30% da capacidade instalada. Na Califórnia, entre 1987 e 1991, uma queda da geração de energia por fontes hidráulicas levou a um aumento no consumo de combustíveis fósseis e aumento do valor aos consumidores. [29]

Em 2001, um grande episódio ficou conhecido como “o apagão”, e foi resultado de um longo período de seca. Nos últimos tempos, então, surgiu-se a necessidade da utilização de novas formas de fontes de energia, porém, até poucas décadas, a hidroeletricidade era responsável por suprir 95% da demanda. [30]

Para incluir a demanda gerada pelos veículos elétricos na matriz Elétrica, é necessário avaliar o consumo energético de cada automóvel. Um estudo levando em consideração o modelo BMW i3 e o ciclo de condução NEDC, apresentou um consumo de energia de 130,67 Wh/km para trajetos sem utilização de dispositivos auxiliares. Este valor comparado com o da literatura de 135 Wh/km apresenta um erro de 3%. Caso seja considerada a utilização de dispositivos auxiliares até 300W, o erro aumenta para 5,9% (142,66 Wh/km). Entretanto, os valores fornecidos na literatura pela EPA (*Environmental Protection Agency*) para o mesmo modelo de veículo são de 179 Wh/km, valor que se aproxima mais a um dos resultados encontrados pelos autores, de 176,6 Wh/km com os dispositivos auxiliares. [31]

De acordo com Teixeira e Sodré [9], um veículo elétrico consome aproximadamente 0,1084 kWh/km, para as condições que foram citadas no tópicos anterior. Nessa avaliação dos autores, o consumo de energia de um veículo elétrico pode ser cerca de 15% de um veículo convencional. Outro estudo reafirma a conclusão obtida, pois concluem que para uma mesma distância, os veículos elétricos consomem menos energia que os veículos com motores de combustão interna movidos a gasolina ou etanol, pois o motor elétrico é mais eficiente do que o motor de combustão interna. [32]

A eletrificação de veículos pode acarretar em um aumento explosivo da demanda de energia que poderá afetar diretamente a rede elétrica [33]. Para a análise de um cenário puramente teórico, em que 100% da frota de São Paulo seria formada por veículos

elétricos, seria necessário aumentar o fornecimento de eletricidade em 19,3%. Em termos de energia, esse aumento equivale a 4000 GWh [32]. O mesmo estudo estimou que em 2035, em um caso da frota de São Paulo totalmente eletrificada, a demanda de eletricidade da frota seria equivalente a quase 20% de toda a demanda do estado. Considerando que em 2021, o consumo de energia aumentou 4,6% em relação ao ano de 2020 [34] e 1,5% de 2021 para 2022 [35], a eletrificação da frota de veículos de São Paulo causaria desequilíbrio na geração e distribuição de energia de todo o Brasil.

De acordo com Hunt et al.[36], a energia armazenada nos reservatórios na década de 70, era capaz de suprir uma demanda de dois a três anos. Em 2018, o armazenamento total possível dos reservatórios só seria capaz de suprir a demanda de quatro a cinco meses. Isso mostra o quanto a demanda de energia elétrica já está aumentando, mesmo sem grande parte da frota estar eletrificada.

No Brasil, ao final do século XXI, a produção de energia poderia diminuir em 7% devido ao aumento de temperatura e diminuição de chuvas [29], tornando este um ponto de alerta para eletrificar toda a frota brasileira, sendo necessário realizar planos de carregamento para evitar sobrecargas no sistema e controlar a inflação dos preços da energia.

2.3 IMPACTOS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NA REDE ELÉTRICA

Ao pensar em mudanças em quantidades significativas, como por exemplo, a eletrificação da frota veicular, é certo que haverá impactos que devem ser mensurados antes de afetarem negativamente o meio em que estão inseridos. Richardson [37] apontou que é possível analisar o impacto dos veículos elétricos de duas principais perspectivas: do ponto de vista da rede elétrica e para os consumidores da tecnologia. Por exemplo, o preço da aquisição de um veículo elétrico é maior que de um veículo com motor de combustão interna, contudo, a fonte de energia e os custos operacionais são menores para os veículos elétricos, devido ao motor elétrico ser mais eficiente.

Os veículos elétricos interagem com a rede elétrica no momento de carregamento de sua bateria. Segundo dados de fabricantes reunidos por Das et. al. [38] para carregar uma bateria de 0% a 80% de um veículo eletrificado, dependendo da tensão da infraestrutura de carregamento e autonomia da bateria, o tempo pode variar de 30 minutos (Nissan LEAF, 40 kWh) em recarga rápida até 9 horas e 20 minutos (Chevrolet VOLT, 60 kWh) com uma tensão de 220V aproximadamente, sem considerar os veículos teslas que podem demorar dias para carregar [38]. Portanto, é necessário que existam estratégias que permitam que esta interação ocorra de forma controlada, para evitar que ocorra sobrecarga na rede elétrica, surgindo a necessidade dos planos de carregamento, que podem ser [37]:

- Plano de carregamento simples: A bateria carrega imediatamente quando conectada;
- Plano de carregamento com atraso: A bateria começa a carregar depois de um tempo definido;
- Plano de carregamento noturno: Existe um atraso para carregar a bateria para que aconteça durante o período noturno e esteja completamente carregado pela manhã.
- Carregamento inteligente: Necessita de um controle sobre o carregamento pelo veículo ou pelo sistema que será utilizado para carregar.

Um estudo no Reino Unido, avaliou que cada carro elétrico aumentaria o consumo de energia em 4-5 kWh, mas este valor diminuiria no futuro pois existiria maior

infraestrutura e mais estações de carregamento disponíveis [39]. Uma frota de aproximadamente um milhão de veículos elétricos, consumiria aproximadamente 205 TWh de eletricidade ao ano, conforme o estudo de Richardson [37]. O aumento da demanda de energia elétrica acarretará em um aumento do seu preço [40]

Para minimizar o impacto negativo dos custos [41], é necessário um gerenciamento dos carregamentos dos veículos elétricos. Segundo Cao et al. [42] um padrão de carregamento otimizado, definindo horários específicos para as recargas dos veículos, pode reduzir em até 15% o custo de energia para os consumidores, sendo que o uso por região e os momentos de pico e vale podem ser análise que proporcionam melhores resultados [42], [43].

Para os veículos elétricos o maior custo é o da bateria, que pode variar entre \$8000 e \$11000, mas é estimado que este valor caía para \$133/kWh [44] até 2025 em uma estimativa da UBS, uma empresa de serviços financeiros. Os autores Lutsey e Nicholas [44] conseguiram atualizar os preços de custo em relação a UBS e chegaram em um custo do pacote da bateria de \$104/kWh. O custo de veículos elétricos será próximo ao dos veículos de motores de combustão interna entre 2024-2028, podendo ser reduzido em até um ano caso a tecnologia das baterias avance e seus preços diminuam [44].

Os custos envolvidos e as estratégias de carregamento são aspectos que solicitam uma grande infraestrutura para a adaptação dos veículos elétricos, dessa forma, é necessário que as organizações competentes sejam capazes de incentivar esta transição rumo a descarbonização do setor de transporte fornecendo as infraestruturas adequadas como estações de carregamento por exemplo e incentivos financeiros para que os veículos elétricos se tornem atrativos do ponto de vista dos consumidores.

2.4 POLÍTICAS DE INCENTIVOS

Para reduzir a emissão de gases do efeito estufa, as políticas de incentivo se tornam fundamentais em diversos fatores pois existe uma tendência de que quanto maior o incentivo mais fácil a penetração dos veículos elétricos. [45]. O custo dos veículos deve ser complementado com outros benefícios como redução das taxas para licenciar, via exclusiva para veículos eletrificados entre outros, para tornar a eletrificação mais atrativa para os consumidores [45].

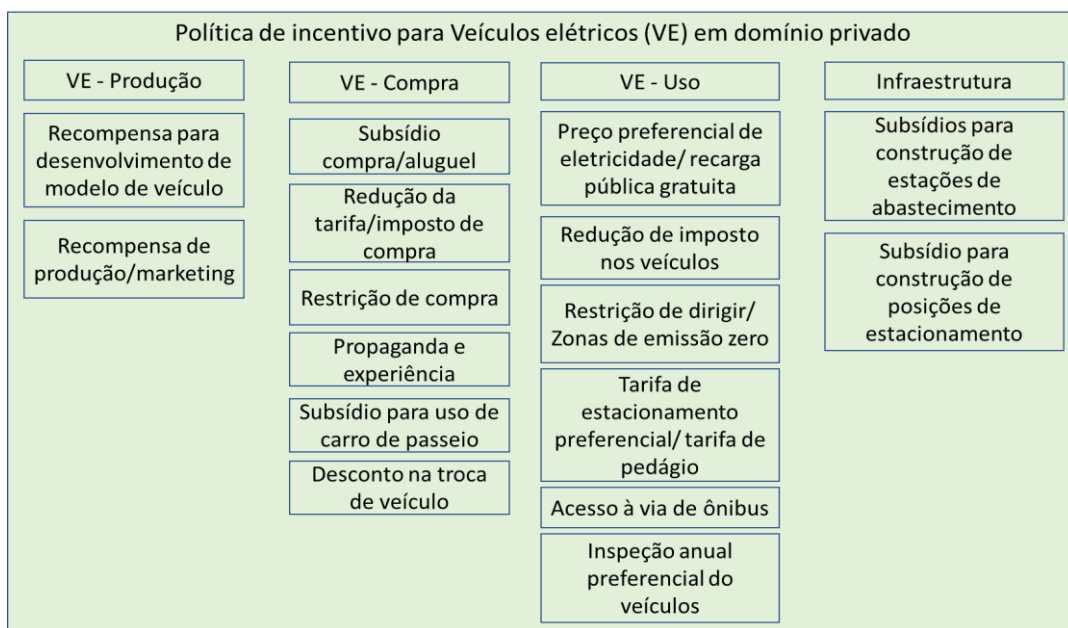
Utilizando de três modos diferentes para investigar diferentes aspectos da eficiência de incentivos, Jenn et al.[46] estimaram qual o impacto dos incentivos na difusão da tecnologia dos veículos elétricos nos Estados Unidos. Para este estudo, os autores estimaram que a cada mil dólares investidos em incentivos na forma de desconto de taxas por veículos, a média de crescimento da venda de veículos elétricos aumentaria em 2,6%. Um outro estudo estatístico de alta dimensão com efeitos fixos nos 50 estados dos Estados Unidos concluiu que com os mesmos mil dólares de incentivo o registro dos veículos elétricos aumenta de 5% a 11% [47].

Do lado oriente do planeta, na China, foram realizadas a implementação em três fases diferentes, sendo a primeira no período de 2009 a 2012, com o objetivo de contemplar 25 cidades com incentivos para fazer um teste piloto. De 2013 até 2015, a expansão atingiu 88 cidades e passou a ter subsídios fiscais, na última fase, 2016 a 2020, os incentivos contemplaram todas as cidades chinesas, mas os subsídios financeiros foram reduzidos [48]. A política de Crédito Duplo considera os créditos de Consumo Médio Corporativo de Combustível (CMCC) e Veículos da nova energia (VNE) e exige que todos os Fabricantes de Equipamentos Originais (FEO) na China alcancem resultados positivos

para ambos. foi adicionada em paralelo às etapas descritas, que contemplava créditos para os padrões de consumo “*Corporate Average Fuel Consumption*” e créditos para veículos de nova energia. Analisando a política “*Dual-credit*” os autores encontraram lacunas entre o número de veículos estimados e os vendidos, o que demonstra desafios de implementação das políticas e pressão de políticas [48].

Outro estudo conduzido na China utilizando um modelo de escolha discreta envolvendo 247 respondentes, estudou a efetividade de diferentes políticas, chegando na conclusão de que veículos elétricos serem isentos de restrições de compra e direção são o que mais influenciam na aceitação deles, via preferencial e desconto em recarga também são pontos com boa contribuição e, comparativamente, incentivos fiscais durante a fase de uso apresentam a menor contribuição para o incentivo Wang et al. [49] compilou de forma visual os principais incentivos conforme a Figura 4:

Figura 6: Classificação dos tipos e incentivos. [50]



Mersky [51] em um estudo conduzido na Noruega com veículos elétricos, concluiu que a isenção de taxas de pedágio e liberação para utilizar vias de ônibus tem pouca influência em níveis municipais, sendo que, para este nível, o fator mais atrativo é a infraestrutura de carregamento.

Similar ao estudo conduzido por Mersky [51] na Noruega, Jenn et al. [52] conduziu um estudo na Califórnia entrevistando proprietários de veículos elétricos e conseguiu concluir que, diferentemente do estudo europeu, ter acesso as vias prioritárias para veículos largos passam é um fator importante, assim como desconto em impostos do estado e crédito federal, tornando estes os principais pontos para proprietários de veículos híbridos plugáveis.

Do ponto de vista do consumidor, um estudo conduzido por da Silva, Sobrinho e de Souza [53] concluiu que seriam necessários mais de 24 anos em média para o Brasil para ter o “*payback*” da compra de um veículo elétrico. Os autores ainda propõem que seja descontado as taxas anuais sobre os veículos, nesse cenário, em 10 anos e 5 meses

aproximadamente os consumidores teriam o “*payback*”. Apesar dos resultados obtidos, é esperado que os custos dos veículos elétricos e a manutenção diminuam até 2030 [44].

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As preocupações a respeito do clima já datam de muitos anos, sendo assim, diversas atitudes foram tomadas para minimizar o impacto humano no meio ambiente. Para este estudo em questão, a tecnologia analisada para mitigar a emissão de CO₂ foi a de eletrificar o setor de transporte, em particular os veículos leves.

Analisando a emissão de poluentes, os veículos elétricos demonstram uma solução para reduzir a emissão de gases do efeito estufa quando comparados com tecnologia dos motores de combustão interna. Os resultados positivos se potencializam quando as fontes de geração de energia são majoritariamente renováveis, como é o caso do Brasil. Em contrapartida, os níveis de toxicidade para os humanos podem aumentar com os veículos elétricos pelo alto uso de metais, químicos e energia para a produção das baterias. Contudo, no Brasil, devido a matriz de energia, os impactos ambientais como formação de oxidantes fotoquímicos, acidificação oceânica, eutrofização, a tecnologia utilizando veículos elétricos à bateria apresentam bons resultados no Brasil.

Mesmo com o aspecto positivo para mitigar a emissão de poluentes, a implementação de veículos elétricos causará impactos nas redes elétricas. Apesar dos motores elétricos necessitarem de menos energia do que os motores de combustão interna, uma alta penetração dessa tecnologia pode criar um desequilíbrio entre a oferta e demanda de energia. Neste cenário, são necessárias estratégias para evitar picos de consumo de energia ou aumentar a geração de energia. Planejar os horários de carregamento dos veículos é uma adaptação necessária que, além de benéfica para a rede elétrica, será também benéfica para os consumidores.

Sabendo-se que, a eletrificação do setor de transporte é uma alternativa viável para a mitigação da emissão de gases do efeito estufa, uma das barreiras para implementação desta tecnologia será a aceitação dos consumidores, uma vez que os veículos elétricos necessitam de um investimento inicial maior do que os veículos convencionais. Para resolver este problema, incentivos financeiros, isenções fiscais e outros benefícios proporcionados pelos governos tornam-se um ponto chave para o sucesso da eletrificação da frota veicular. Dentre estes benefícios, a redução de impostos pagos e as estruturas de carregamento são grandes contribuidores para a adaptação dos veículos elétricos. As políticas de incentivo são uma ferramenta importante para promover a adoção de carros elétricos, mas também é necessário um compromisso a longo prazo com a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis para garantir que os carros elétricos sejam uma opção cada vez mais limpa e sustentável no futuro.

Com o objetivo de atingir as metas do acordo de Paris para reduzir a emissão de gases do efeito estufa, a estratégia de utilização de veículos elétricos no setor de transporte atingirá os níveis desejados de emissão no Brasil, visto que a matriz elétrica do país é majoritariamente renovável e caminha para cada vez mais apresentar uma distribuição proporcional das fontes de geração para que em períodos de seca seja possível compensar com fonte eólicas ou solares. Contudo, esta abordagem precisa ser acompanhada de outras tecnologias como substituição dos combustíveis derivados do petróleo por biocombustíveis., os resultados podem ser potencializados se forem combinados em veículos híbridos, em especial no Brasil, que apresenta grande vocação para produção e uso de bioenergia.

REFERÊNCIAS

- [1] A. El-Sayed and M. Kamel, “Climatic changes and their role in emergence and re-emergence of diseases,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 18. Springer, pp. 22336–22352, Jun. 01, 2020. doi: 10.1007/s11356-020-08896-w.
- [2] G. Kalghatgi, “Is it really the end of internal combustion engines and petroleum in transport?,” *Applied Energy*, vol. 225. Elsevier Ltd, pp. 965–974, Sep. 01, 2018. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.05.076.
- [3] E. Figenbaum, “Perspectives on Norway’s supercharged electric vehicle policy,” *Environ Innov Soc Transit*, vol. 25, pp. 14–34, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.eist.2016.11.002.
- [4] K. Roberto, R. Stahelin, and M. Pauli, “UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA,” 2021.
- [5] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, “A review on electric vehicles: Technologies and challenges,” *Smart Cities*, vol. 4, no. 1. MDPI, pp. 372–404, Mar. 01, 2021. doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [6] E. Jordão and A. Kakuta, “Em ano de recordes, veículos plug-in avançam,” <http://www.abve.org.br/em-ano-de-recordes-veiculos-plug-in-ganham-mercado/>, Feb. 13, 2023.
- [7] M. Buranelli de Oliveira, H. Moretti Ribeiro da Silva, D. Jugend, P. de Camargo Fiorini, and C. E. Paro, “Factors influencing the intention to use electric cars in Brazil,” *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 155, pp. 418–433, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.tra.2021.11.018.
- [8] R. Baran and L. F. L. Legey, “The introduction of electric vehicles in Brazil: Impacts on oil and electricity consumption,” *Technol Forecast Soc Change*, vol. 80, no. 5, pp. 907–917, Jun. 2013, doi: 10.1016/j.techfore.2012.10.024.
- [9] A. C. R. Teixeira and J. R. Sodr e, “Impacts of replacement of engine powered vehicles by electric vehicles on energy consumption and CO₂ emissions,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 59, pp. 375–384, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.trd.2018.01.004.
- [10] N. Rietmann, B. Hügler, and T. Lieven, “Forecasting the trajectory of electric vehicle sales and the consequences for worldwide CO₂ emissions,” *J Clean Prod*, vol. 261, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121038.
- [11] AVL, “Simulation Solutions,” <https://www.avl.com/en/simulation-solutions>, Mar. 06, 2023.
- [12] R. Garcia and F. Freire, “A review of fleet-based life-cycle approaches focusing on energy and environmental impacts of vehicles,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79. Elsevier Ltd, pp. 935–945, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.145.

- [13] L. M. M. Benvenuti and L. M. S. Campos, "A fleet-based tank-to-wheel greenhouse gas emission analysis of light vehicles in Brazil and cooperation towards integrated policies," *Int J Sustain Transp*, vol. 14, no. 4, pp. 255–269, Feb. 2020, doi: 10.1080/15568318.2018.1542757.
- [14] J. R. Woo, H. Choi, and J. Ahn, "Well-to-wheel analysis of greenhouse gas emissions for electric vehicles based on electricity generation mix: A global perspective," *Transp Res D Transp Environ*, vol. 51, pp. 340–350, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.trd.2017.01.005.
- [15] T. Bicalho, I. Sauer, A. Rambaud, and Y. Altukhova, "LCA data quality: A management science perspective," *J Clean Prod*, vol. 156, pp. 888–898, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.229.
- [16] M. A. Curran, "US EPA Life Cycle Assessment: Principles and Practice," 2006.
- [17] J. Enrique Velandia Vargas, "Análise da competitividade ambiental de veículos elétricos no Brasil no cenário atual e futuro," Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016. doi: 10.47749/T/UNICAMP.2016.976092.
- [18] K. Glensor and B. María Rosa Muñoz, "Life-cycle assessment of Brazilian transport biofuel and electrification pathways," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 11, no. 22, Nov. 2019, doi: 10.3390/su11226332.
- [19] P. Marques, R. Garcia, L. Kulay, and F. Freire, "Comparative life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles addressing capacity fade," *J Clean Prod*, vol. 229, pp. 787–794, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.026.
- [20] C. Aichberger and G. Jungmeier, "Environmental life cycle impacts of automotive batteries based on a literature review," *Energies*, vol. 13, no. 23. MDPI AG, Dec. 01, 2020. doi: 10.3390/en13236345.
- [21] E. F. Choma and C. M. L. Ugaya, "Environmental impact assessment of increasing electric vehicles in the Brazilian fleet," *J Clean Prod*, vol. 152, pp. 497–507, May 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.07.091.
- [22] D. A. Lopes Silva, J. A. de Oliveira, R. A. Padovezi Filleti, J. F. Gomes de Oliveira, E. Jannone da Silva, and A. R. Ometto, "Life Cycle Assessment in automotive sector: A case study for engine valves towards cleaner production," *J Clean Prod*, vol. 184, pp. 286–300, May 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.252.
- [23] Maarten, "Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles."
- [24] H. Huo, H. Cai, Q. Zhang, F. Liu, and K. He, "Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles: A comparison between China and the U.S.," *Atmos Environ*, vol. 108, pp. 107–116, May 2015, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.02.073.
- [25] L. L. P. de Souza, E. E. S. Lora, J. C. E. Palacio, M. H. Rocha, M. L. G. Renó, and O. J. Venturini, "Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a

- sustainable transportation system in Brazil,” *J Clean Prod*, vol. 203, pp. 444–468, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.236.
- [26] J. E. V. Vargas, J. E. A. Seabra, C. K. N. Cavaliero, A. C. S. Walter, S. P. Souza, and D. G. Falco, “The new neighbor across the street: An outlook for battery electric vehicles adoption in Brazil,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 11, no. 3. MDPI AG, Sep. 01, 2020. doi: 10.3390/WEVJ11030060.
- [27] E. Vasquez-Arroyo, D. A. Gandelman, F. da Silva, L. Magalar, D. v. Santos, and A. F. P. Lucena, “Implications of climate change impacts for the Brazilian electricity mix,” *Sustentabilidade em Debate*, vol. 11, no. 3, pp. 122–138, Dec. 2020, doi: 10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33998.
- [28] Empresa de Pesquisa Energética, “Matriz Energética e Elétrica,” <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#TOPO>, Feb. 13, 2023.
- [29] P. Mukheibir, “Potential consequences of projected climate change impacts on hydroelectricity generation,” *Clim Change*, vol. 121, no. 1, pp. 67–78, Nov. 2013, doi: 10.1007/s10584-013-0890-5.
- [30] M. P. Belançon, “Brazil electricity needs in 2030: Trends and challenges,” *Renewable Energy Focus*, vol. 36, pp. 89–95, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ref.2021.01.001.
- [31] I. Miri, A. Fotouhi, and N. Ewin, “Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study,” *Int J Energy Res*, vol. 45, no. 1, pp. 501–520, Jan. 2021, doi: 10.1002/er.5700.
- [32] M. V. X. Dias *et al.*, “The impact on electricity demand and emissions due to the introduction of electric cars in the São Paulo power system,” *Energy Policy*, vol. 65, pp. 298–304, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2013.09.052.
- [33] Y. M. Saputra, D. T. Hoang, D. N. Nguyen, E. Dutkiewicz, M. D. Mueck, and S. Srikanteswara, “Energy Demand Prediction with Federated Learning for Electric Vehicle Networks,” in *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Dec. 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013587.
- [34] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA 2022 Ano base 2021,” <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Fact%20Sheet%20-%20Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202022.pdf>, Feb. 13, 2023.
- [35] COMERCIALIZAÇÃO CONSUMO DISTRIBUIÇÃO GERAÇÃO MERCADO, “Consumo brasileiro de energia elétrica subiu 1,5% em 2022, mostra balanço da CCEE,” <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/consumo-brasileiro-de-energia-eletrica-subiu-1-5-em-2022-mostra-balanco-da->

- [47] S. Wee, M. Coffman, and S. la Croix, "Do electric vehicle incentives matter? Evidence from the 50 U.S. states," *Res Policy*, vol. 47, no. 9, pp. 1601–1610, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.respol.2018.05.003.
- [48] Y. A. Wu, A. W. Ng, Z. Yu, J. Huang, K. Meng, and Z. Y. Dong, "A review of evolutionary policy incentives for sustainable development of electric vehicles in China: Strategic implications," *Energy Policy*, vol. 148, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2020.111983.
- [49] N. Wang, L. Tang, and H. Pan, "A global comparison and assessment of incentive policy on electric vehicle promotion," *Sustain Cities Soc*, vol. 44, pp. 597–603, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.scs.2018.10.024.
- [50] N. Wang, L. Tang, and H. Pan, "Effectiveness of policy incentives on electric vehicle acceptance in China: A discrete choice analysis," *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 105, pp. 210–218, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.tra.2017.08.009.
- [51] A. C. Mersky, F. Sprei, C. Samaras, and Z. S. Qian, "Effectiveness of incentives on electric vehicle adoption in Norway," *Transp Res D Transp Environ*, vol. 46, pp. 56–68, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.trd.2016.03.011.
- [52] A. Jenn, J. H. Lee, S. Hardman, and G. Tal, "An in-depth examination of electric vehicle incentives: Consumer heterogeneity and changing response over time," *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 132, pp. 97–109, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.tra.2019.11.004.
- [53] R. E. da Silva, P. M. Sobrinho, and T. M. de Souza, "How can energy prices and subsidies accelerate the integration of electric vehicles in Brazil? An economic analysis," *Electricity Journal*, vol. 31, no. 3, pp. 16–22, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.tej.2018.03.007.