

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RODRIGO ALBERTINI ESTEVES

UTILIZAÇÃO DE VEÍCULOS HÍBRIDOS MOVIDOS A ETANOL COM FOCO NA
TRANSIÇÃO E ELETRIFICAÇÃO DA FROTA

Curitiba

2024

RODRIGO ALBERTINI ESTEVES

UTILIZAÇÃO DE VEÍCULOS HÍBRIDOS MOVIDOS A ETANOL COM FOCO NA
TRANSIÇÃO E ELETRIFICAÇÃO DA FROTA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação da Pós-Graduação em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis, Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Gestão Estratégica em Energias Naturais Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Dhyogo Miléo Taher

Curitiba

2024

RESUMO

Esse trabalho discute a importância de veículos híbridos e elétricos no contexto de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE). O objetivo foi analisar a eficiência ambiental dos veículos híbridos movidos a etanol, comparando-os com veículos elétricos. Utilizou-se a revisão bibliométrica de publicações dos últimos dez anos, abordando temas como o impacto ambiental, o ciclo de vida das baterias, e as perspectivas futuras para a adoção de veículos sustentáveis no Brasil. Foi evidenciado que, embora os veículos elétricos sejam promissores na redução das emissões durante a operação, sua produção, especialmente no que tange às baterias de íon-lítio, ainda apresenta importantes desafios ambientais. Em contrapartida, o etanol, devido à sua produção a partir de fontes renováveis como a cana-de-açúcar, destaca-se como uma alternativa viável para motores híbridos no Brasil, aproveitando a infraestrutura já existente e contribuindo para uma matriz energética mais sustentável. Por fim, discute-se a importância das políticas públicas, os desafios de infraestrutura para veículos elétricos, e as oportunidades para o Brasil na liderança do desenvolvimento de tecnologias híbridas que utilizam etanol.

Palavras chave: eficiência ambiental; veículos híbridos; etanol; veículos elétricos; impacto ambiental; políticas públicas.

ABSTRACT

This work discusses the importance of hybrid and electric vehicles in the context of reducing greenhouse gas (GHG) emissions. The objective was to analyze the environmental efficiency of ethanol-powered hybrid vehicles by comparing them with electric vehicles. A bibliometric review of publications from the last ten years was conducted, addressing topics such as environmental impact, battery life cycle, and future prospects for the adoption of sustainable vehicles in Brazil. It was shown that although electric vehicles are promising in reducing emissions during operation, their production, especially regarding lithium-ion batteries, still presents significant environmental challenges. In contrast, ethanol, due to its production from renewable sources like sugarcane, stands out as a viable alternative for hybrid engines in Brazil, leveraging existing infrastructure and contributing to a more sustainable energy matrix. Finally, the importance of public policies, infrastructure challenges for electric vehicles, and opportunities for Brazil to lead in the development of ethanol-based hybrid technologies are discussed.

Keywords: environmental efficiency; hybrid vehicles; ethanol; electric vehicles; environmental impact; public policies.

LISTA DE SIGLAS

CO ₂	Dióxido de Carbono
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases do Efeito Estufa
ICCT	International Council on Clean Transportation
ISO	International Organization for Standardization
PPP	Parceria Público Privada
VEs	Veículos Elétricos
VE-Cac	Veículos elétricos a célula de combustível
VE-Li	Veículos elétricos a bateria de íon-lítio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
2	OBJETIVOS.....	8
2.1	OBJETIVO GERAL.....	8
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
3	METODOLOGIA.....	9
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
4.1	EVOLUÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS.....	10
4.2	SUSTENTABILIDADE E IMPACTO AMBIENTAL.....	11
4.2.1	Avaliação do ciclo de vida (ACV) de veículos elétricos.....	11
4.2.2	Redução das emissões de gases de efeito estufa.....	13
4.2.3	Desafios e oportunidades, créditos de carbono e incentivos econômicos.....	13
4.3	INFRAESTRUTURA ENERGÉTICA E DESAFIOS REGIONAIS.....	14
4.3.1	Infraestrutura para suporte aos veículos elétricos no Brasil.....	14
4.3.2	Desafios específicos: estudo de caso na Guiana.....	15
4.3.3	O papel das políticas públicas na transição energética.....	16
4.4	O USO DE ETANOL EM MOTORES HÍBRIDOS NO BRASIL.....	18
4.4.1	História e contexto do etanol no Brasil.....	18
4.4.2	Motores híbridos a etanol: tecnologia e benefícios.....	18
4.4.3	Viabilidade, desafios e perspectivas para o futuro.....	19
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	21
	REFERÊNCIAS.....	22

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm incentivado a busca por alternativas mais sustentáveis no setor de transportes. Diante disso, veículos híbridos e veículos elétricos (VEs), emergem como soluções promissoras para minimizar o impacto ambiental dos automóveis. Os veículos híbridos combinam um motor de combustão interna com um motor elétrico, enquanto os VEs dependem exclusivamente de energia elétrica armazenada em baterias (Sugahara, 2023).

Estudos comparativos entre veículos híbridos movidos a etanol e VEs são essenciais para entender as vantagens e desvantagens de cada tecnologia. A análise das emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia, autonomia, e impacto ambiental ao longo do ciclo de vida dos veículos são aspectos fundamentais para esta avaliação (ICCT, 2023). Além disso, a infraestrutura de abastecimento e a matriz energética local são fatores determinantes para a eficiência ambiental de ambas as tecnologias (Barbosa, 2024).

Os biocombustíveis, como o etanol, são considerados mais sustentáveis do que os combustíveis fósseis, uma vez que sua produção e uso podem resultar em menores emissões líquidas de dióxido de carbono (CO_2). Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (2021), o etanol é amplamente utilizado no Brasil, uma vez que é produzido em larga escala a partir da cana-de-açúcar e milho. Esse processo de produção se destaca por uma alta eficiência energética e menores emissões de gases poluentes (EPE, 2021). Por outro lado, os VEs apresentam popularidade crescente mundialmente e surgem como uma alternativa de transporte livre de emissões durante suas operações, embora a origem da eletricidade utilizada seja crucial para determinar sua eficiência ambiental total (ICCT, 2023).

Diante do exposto, este artigo tem como objetivo comparar a eficiência ambiental dos veículos híbridos movidos a biocombustível etanol à dos VEs, considerando diferentes cenários e fontes de energia. Para isso, a partir de uma revisão da literatura e análise de dados empíricos, buscou-se fornecer uma visão abrangente sobre as implicações ambientais de cada tecnologia e suas potencialidades na mitigação dos impactos climáticos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a eficiência ambiental do uso do biocombustível etanol em veículos híbridos em comparação às demais alternativas, no curto prazo e considerando toda a infraestrutura disponível no Brasil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar as diferentes opções de veículos disponíveis;
- Pesquisar sobre o processo produtivo e o descarte das baterias utilizadas nos carros híbridos e elétricos;
- Analisar as fontes energéticas e elétricas disponíveis;
- Comparar as emissões de poluentes de cada veículo;
- Analisar o impacto socioambiental resultante das diferentes tecnologias.

3 METODOLOGIA

Trata-se de uma revisão bibliométrica elaborada a partir de análise bibliográfica realizada em período definido nos últimos 10 anos (2014 – 2024). Foram utilizadas as palavras-chave “Veículo híbrido”, “*Hybrid vehicle*”, “etanol”, “*ethanol*”, “Veículo elétrico”, “*Electric vehicle*”, “Sustentável” / “Sustentabilidade”, “*sustainable*”/“*sustainability*” nos Periódicos Capes via Comunidade Acadêmica Federada (CAFe) da Universidade Federal do Paraná. Além disso, para aprimoramento da revisão, utilizou-se os operadores booleanos “AND” e “OR” (Quadro 1).

QUADRO 1 - ESTRATÉGIA DE BUSCA UTILIZADA NA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA SOBRE A “UTILIZAÇÃO DE VEÍCULOS HÍBRIDOS MOVIDOS A ETANOL COM FOCO NA TRANSIÇÃO E ELETRIFICAÇÃO DA FROTA”.

PORTAL	ESTRATÉGIA DE BUSCA
Portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)	(Veículo híbrido OR Hybrid vehicle) AND (etanol OR ethanol) OR (Veículo elétrico OR Electric vehicle) AND sust*

FONTE: O autor (2024).

Foram incluídos artigos em língua portuguesa ou inglesa, que continham informações abordando a importância dos veículos híbridos movidos a etanol e elétricos no cenário atual de mobilidade sustentável, abordando suas vantagens e desvantagens. Foram excluídos artigos encontrados sem o texto completo, repetidos, em idiomas diferentes dos definidos acima e que se distanciavam dos objetivos do presente estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, foram identificados 30 artigos de acordo com os critérios descritos na metodologia. Após o procedimento de exclusão de artigos duplicados, leitura dos títulos e resumos, e aplicação dos supracitados critérios de exclusão, foram selecionados 14 artigos que foram integralmente lidos para a realização da presente revisão. Além disso, outras 10 referências foram incluídas e obtidas através da busca manual.

4.1 EVOLUÇÃO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS E HÍBRIDOS

A história dos VEs remonta ao início do século XIX, quando surgiram os primeiros protótipos, que competiam diretamente com os veículos a combustão interna. No entanto, as limitações tecnológicas da época, como a baixa capacidade de armazenamento das baterias e a ausência de infraestrutura de recarga, retardaram o desenvolvimento desses veículos (Silva, 2023).

No Brasil, o desenvolvimento de VEs foi marcado por iniciativas pioneiras, como o projeto da Itaipu Binacional, que testou VEs em pequena escala. A falta de infraestrutura e os altos custos iniciais, no entanto, foram obstáculos significativos para a adoção em massa desses veículos (Ramos *et al.*, 2012).

A partir da década de 90, os veículos híbridos surgiram como uma solução intermediária, combinando motores de combustão interna com motores elétricos para melhorar a eficiência energética e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Essa tecnologia é vista como um passo crucial para a transição completa para VEs (Silva, 2023). Ainda nos dias de hoje, a adoção dos veículos híbridos pode ser consideradas como uma tecnologia de ponte, facilitando a transição entre a gasolina e a eletricidade no setor de transportes (Chrispim; Souza; Simões, 2019).

Os VEs à bateria de íon-lítio (VE-Li) são atualmente a tecnologia predominante no mercado de VEs. Esses veículos utilizam baterias de íon-lítio devido à sua alta densidade de energia, vida útil relativamente longa e eficiência em termos de recarga e armazenamento de energia (Reis e Silva, 2022). As baterias de íon-lítio se destacam por sua capacidade de suportar ciclos de carga e descarga repetidos sem perda

significativa de desempenho, o que as tornam adequadas para o uso diário em VEs (Silva, 2023).

No entanto, apesar de suas vantagens, os VE-Li enfrentam desafios significativos. A produção de baterias de íon-lítio depende de recursos naturais como lítio, cobalto e níquel, cuja extração e processamento têm impactos ambientais consideráveis. Além disso, o descarte dessas baterias ao final de sua vida útil representa outro desafio ambiental, devido ao potencial de contaminação do solo e da água (Reis e Silva, 2022). No Brasil, a infraestrutura para reciclagem de baterias ainda é incipiente, o que agrava esses problemas ambientais (Ramos *et al.*, 2012)

Os VEs à célula de combustível (VE-CaC) utilizam hidrogênio para gerar eletricidade a bordo, emitindo apenas vapor d'água como subproduto. Essa tecnologia oferece a promessa de um transporte verdadeiramente limpo, desde que o hidrogênio seja produzido a partir de fontes renováveis. No entanto, a produção de hidrogênio, o armazenamento e a distribuição ainda representam desafios técnicos e econômicos significativos (Vernalha e Seixas, 2022).

Comparados aos VE-Li, os VE-CaC têm a vantagem de tempos de reabastecimento mais rápidos e maior autonomia. No entanto, a infraestrutura para o abastecimento de hidrogênio é muito menos desenvolvida do que a infraestrutura para a recarga de VEs a bateria, especialmente em países como o Brasil, onde as políticas públicas ainda não priorizam essa tecnologia (Silva, 2023). Além disso, o custo de produção das células de combustível e do hidrogênio ainda é elevado, o que limita a adoção em larga escala dessa tecnologia (Ramos *et al.*, 2012). A produção de veículos elétricos representa uma estratégia efetiva em relação aos veículos convencionais no que se refere à mitigação das mudanças climáticas globais, porém, isso irá depender efetivamente do quão “limpa” é a matriz elétrica de cada país (Chripim; Souza; Simões, 2019).

4.2 SUSTENTABILIDADE E IMPACTO AMBIENTAL

4.2.1 Avaliação do ciclo de vida (ACV) de veículos elétricos.

A ACV é padronizada pela *International Organization for Standardization* (ISO), que elaborou a ISO 14040 sobre a Avaliação do Ciclo de Vida, publicada no Brasil

pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). De acordo com a ISO 14040 (2006), a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia estruturada em quatro etapas principais: definição de objetivos e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados. Esse método permite quantificar os impactos ambientais em cada fase do ciclo de vida do produto, oferecendo uma visão completa dos efeitos ambientais diretos e indiretos associados à produção, uso e descarte das baterias de lítio.

Mesmo que os VEs não emitam poluentes durante seu funcionamento, ainda apresentam impactos ambientais significativos durante as fases de produção e descarte, principalmente devido à fabricação de baterias de íon-lítio. A mineração e o processamento de lítio, cobalto e níquel, metais essenciais para as baterias, são atividades intensivas em energia e podem causar danos ecológicos significativos, como a degradação do solo e a contaminação de recursos hídricos (Reis e Silva, 2022).

Durante a fase de uso, as baterias de lítio são consideradas eficientes em termos de conversão de energia elétrica em potência, o que contribui para a redução das emissões diretas de poluentes durante a operação dos veículos, entretanto, a matriz energética utilizada para recarregar essas baterias também desempenha um papel crucial. Em países como o Brasil, onde a matriz é majoritariamente renovável, o impacto pode ser menor; contudo, em regiões onde a eletricidade provém de fontes fósseis, as vantagens ambientais podem ser muito reduzidas (Freitas e Marchesini, 2022).

O descarte de baterias de lítio representa outro importante desafio ambiental. De acordo com Freitas e Marchesini (2022), as baterias, ao final de sua vida útil, ainda retêm uma quantidade considerável de materiais valiosos que podem e devem ser reciclados. O processo de reciclagem não só recupera esses materiais, mas também minimiza o impacto ambiental ao reduzir a necessidade de novas extrações. No entanto, a reciclagem de baterias de lítio ainda enfrenta barreiras técnicas e econômicas, e a falta de uma infraestrutura robusta para a reciclagem pode resultar em impactos negativos significativos, como a geração de resíduos tóxicos e o desperdício de recursos valiosos (Reis e Silva, 2022).

4.2.2 Redução das emissões de gases de efeito estufa.

Os VEs são frequentemente promovidos como uma solução eficaz para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente CO₂, que é o principal responsável pelo aquecimento global (WWF, [s.d]). A substituição de veículos movidos a combustíveis fósseis por VEs pode reduzir significativamente as emissões, especialmente se a eletricidade utilizada para recarregar as baterias for gerada a partir de fontes renováveis, como eólica e solar (Vernalha e Seixas, 2022).

Um veículo híbrido *plug-in* é um tipo de híbrido cuja bateria utilizada para alimentar o motor elétrico pode ser carregada diretamente por meio de uma tomada (Lukic *et al.*, 2008). No contexto brasileiro, onde a matriz elétrica é composta majoritariamente por fontes renováveis, como hidrelétrica, eólica e solar, os veículos híbridos *plug-in* podem oferecer vantagens ambientais substanciais. Além disso, a utilização do etanol, um biocombustível com baixa pegada de carbono, como complemento no motor a combustão, potencializa os benefícios, tornando os veículos híbridos ainda mais atraentes em termos de sustentabilidade (Santos e Ferreira, 2022). O uso de motores híbridos, utilizando etanol, permite não apenas a diminuição da dependência de combustíveis fósseis, mas também aproveita a infraestrutura existente de distribuição desse biocombustível, tornando essa tecnologia particularmente atraente para o mercado brasileiro (Vernalha e Seixas, 2022).

A análise dos impactos ambientais também revela que, embora os veículos híbridos apresentem uma pegada de carbono menor durante a fase de uso, a produção das baterias e dos motores elétricos ainda contribui para grandes emissões, especialmente na fase de fabricação (Reis e Silva, 2022). Portanto, é crucial que políticas públicas sejam implementadas para incentivar a produção sustentável e a reciclagem de componentes dos veículos híbridos, minimizando assim os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida do produto (Vidal de Barros, 2022).

4.2.3 Desafios e oportunidades, créditos de carbono e incentivos econômicos.

Os países em desenvolvimento enfrentam desafios únicos na transição para VEs, incluindo limitações econômicas, falta de infraestrutura adequada e dependência de importações de tecnologia (Ramos *et al.*, 2012). Por outro lado, o Brasil possui uma

vantagem competitiva em relação a outros países devido à sua abundância de biocombustíveis, como o etanol, que pode ser utilizado em motores híbridos, oferecendo uma alternativa sustentável e economicamente viável para a transição energética (Reis e Silva, 2017; Silva, 2023).

A cooperação internacional e a transferência de tecnologia também desempenham um papel crucial, permitindo que países em desenvolvimento acessem tecnologias avançadas de VEs e construam a infraestrutura necessária para sua implementação (Vernalha e Seixas, 2022).

A obtenção de créditos de carbono através da adoção de VEs é uma estratégia importante para financiar a transição para uma economia de baixo carbono. Os créditos de carbono podem ser obtidos ao se reduzir as emissões de GEE em relação a um cenário de referência, e os VEs oferecem um meio eficaz de alcançar essas reduções, especialmente em países com uma matriz energética limpa, como o Brasil (Ramos *et al.*, 2012).

Os créditos de carbono, por sua vez, não apenas incentivam a adoção de VEs, mas também podem gerar receitas adicionais para as empresas e governos, que podem ser reinvestidas em projetos de sustentabilidade, como o desenvolvimento de tecnologias de reciclagem de baterias e a expansão da infraestrutura de energia renovável (Vernalha e Seixas, 2022).

4.3 INFRAESTRUTURA ENERGÉTICA E DESAFIOS REGIONAIS

4.3.1 Infraestrutura para suporte aos veículos elétricos no Brasil.

Atualmente, a infraestrutura de recarga no Brasil é limitada, com poucas estações disponíveis em grandes centros urbanos e uma ausência quase total em regiões periféricas e rurais. Além disso, a maioria das estações de recarga instaladas são de carregamento lento, o que dificulta a praticidade para os usuários que dependem do uso constante de seus veículos (Ramos *et al.*, 2012). Dessa forma, a transição para VEs no Brasil precisa de uma estratégia nacional coerente que assegure a disponibilidade de estações de recarga de VEs em áreas urbanas e rurais (Silva, 2023). No entanto, o desenvolvimento de uma infraestrutura robusta de recarga requer investimentos significativos tanto do setor público quanto do privado. Nesse

contexto, parcerias público-privadas (PPP) têm sido propostas como uma solução viável para acelerar o desenvolvimento dessa infraestrutura, garantindo que o Brasil possa atender à crescente demanda por VEs (Vernalha e Seixas, 2022). Além disso, a integração de tecnologias de carregamento rápido e o uso de fontes de energia renovável para alimentar as estações de recarga são considerados passos cruciais para garantir a sustentabilidade do sistema.

Outro aspecto importante a se observar é que apesar dos VEs gerarem reduzidas quantidades de GEE durante a utilização, não se pode afirmar isso quanto às suas emissões indiretas. Se a energia utilizada para a sua produção for obtida através de origem fóssil, os VEs podem ser considerados como verdadeiras fontes poluidoras. No Brasil, essas fontes correspondem a 17% da matriz energética, segundo dados da EPE (2021). Nesse sentido, se o objetivo da mudança do modelo tradicional para o elétrico é melhorar o desempenho ambiental, através da redução das emissões dos GEE, se faz necessário que a política de incentivo de uso dos VEs esteja combinada a uma política de expansão das fontes de geração de energia renovável (Cabral Neto; Santos; Pimentel, 2021).

4.3.2 Desafios específicos: estudo de caso na Guiana.

A Guiana, como muitos outros países em desenvolvimento, possui uma rede elétrica que ainda sofre com interrupções frequentes e limitações na capacidade de geração de energia, o que agrava os desafios de fornecimento de eletricidade confiável para o carregamento de VEs, além disso, sofre com o alto custo associado ao desenvolvimento da infraestrutura necessária para suportar os VEs (Woodroffe e Corbin, 2023). Ademais, a ausência de uma rede extensa de estações de recarga aumenta a "ansiedade de alcance" (*range anxiety*) entre os usuários de VEs, devido a preocupação com a disponibilidade de estações de carregamento. A "ansiedade de alcance" combinada às longas distâncias que muitos motoristas precisam percorrer em áreas rurais, torna a adoção de VEs menos atraente, especialmente para os que dependem do transporte diário para o trabalho e outras atividades essenciais (Woodroffe e Corbin, 2023).

Outro desafio significativo enfrentado pela tecnologia é a falta de conscientização e aceitação social da tecnologia de VEs. Muitos consumidores em países em

desenvolvimento têm pouco conhecimento sobre as vantagens dos VEs em comparação com os veículos tradicionais à combustão interna. Isso se traduz em uma resistência à mudança, onde os consumidores preferem manter seus veículos atuais em vez de investir em novas tecnologias (Woodroffe e Corbin, 2023). Para esses consumidores, existe uma forte percepção dos benefícios oferecidos pelos veículos de combustão interna que incluem a segurança, conforto, desempenho mecânico, capacidade de transporte, confiabilidade e o custo. Portanto, existe uma dificuldade em renunciar essas vantagens em favor dos veículos elétricos (Silvestre, 2024).

A falta de campanhas de conscientização eficazes e de programas educacionais que expliquem os benefícios ambientais e econômicos dos VEs também contribuem para essa resistência. Além disso, a transição para VEs exige uma mudança nos hábitos culturais, como a adaptação a novos padrões de recarga e manutenção, o que pode ser difícil para muitos motoristas que estão acostumados a veículos convencionais (Woodroffe e Corbin, 2023).

A Guiana, como muitos outros países em desenvolvimento, também enfrenta desafios regulatórios e políticos na transição para VEs. A falta de políticas públicas robustas e incentivos financeiros que promovam a adoção de VEs é uma barreira significativa. Embora existam algumas iniciativas para isentar impostos sobre VEs, a implementação de políticas mais abrangentes que incluam subsídios diretos para a compra de VEs e investimentos em infraestrutura ainda é limitada (Woodroffe e Corbin, 2023). Além disso, a falta de regulamentações específicas que padronizem o uso de VEs, especialmente em áreas urbanas, pode criar incertezas tanto para consumidores quanto para investidores. A ausência de um quadro regulatório claro que apoie o desenvolvimento de infraestrutura de recarga e a produção local de componentes para VEs limita o crescimento do mercado e a inovação tecnológica no setor (Woodroffe e Corbin, 2023).

4.3.3 O papel das políticas públicas na transição energética.

A tributação indutora é uma das estratégias mais eficazes que o Estado pode utilizar para promover a transição energética. Trata-se do uso de incentivos fiscais, como isenções tributárias e regimes fiscais diferenciados, com o objetivo de estimular comportamentos específicos, como o investimento na produção de VEs e a adoção

de tecnologias limpas. Segundo Silva, Xavier e Bezerra (2022), a aplicação de tais medidas no Brasil, pode ser decisiva para atrair montadoras de VEs, gerando não apenas benefícios econômicos, mas também sociais e ambientais.

Em países desenvolvidos, políticas públicas voltadas para a eletromobilidade, incluindo incentivos fiscais, subsídios diretos e políticas restritivas em relação a veículos à combustão interna, foram fundamentais para o sucesso da transição energética. Essas políticas não só impulsionaram a adoção de VEs como também fomentaram a criação de uma infraestrutura de suporte robusta e o desenvolvimento tecnológico local (Silva; Xavier; Bezerra, 2022).

O impacto das políticas públicas, especialmente as de natureza fiscal, transcende o aspecto ambiental. A instalação de montadoras de VEs no Brasil, promovida através de incentivos tributários, pode resultar em significativos benefícios econômicos, incluindo a criação de empregos e o aumento da competitividade da indústria nacional (Reis e Silva, 2017). Além disso, a indução do mercado interno para a eletromobilidade pode criar um ciclo virtuoso de crescimento econômico sustentável. A demanda crescente por VEs estimularia a produção nacional, diminuindo a dependência de importações e fortalecendo a economia local. Para maximizar esses benefícios, é essencial que as políticas públicas sejam desenhadas de forma integrada, considerando a necessidade de desenvolver paralelamente a infraestrutura de recarga e a capacitação da mão-de-obra para atender a nova demanda (Silva; Xavier; Bezerra, 2022).

Embora as políticas de incentivo fiscal sejam fundamentais, elas não são suficientes por si só para garantir o sucesso da transição energética. É necessário que essas políticas sejam complementadas por um conjunto mais amplo de ações, incluindo investimentos em infraestrutura, desenvolvimento de novas tecnologias e capacitação profissional. Sem uma infraestrutura adequada de recarga, por exemplo, a adoção de VEs pode ser limitada, mesmo com incentivos fiscais atraentes (Silva; Xavier; Bezerra, 2022). Além disso, a integração de fontes de energia renovável na matriz energética é um pré-requisito essencial para que a mobilidade elétrica realmente contribua para a redução das emissões de GEE. À vista disso, políticas públicas que incentivem a expansão de energia solar e eólica, por exemplo, devem ser vistas como complementares às políticas de incentivo à eletromobilidade, garantindo que os VEs utilizem energia limpa (Silva; Xavier; Bezerra, 2022).

4.4 O USO DE ETANOL EM MOTORES HÍBRIDOS NO BRASIL.

4.4.1 História e contexto do etanol no Brasil

A produção mundial de etanol, em 2023, foi de 59,1 bilhões de litros, desse total, o Brasil ocupa a segunda posição, perdendo apenas para os EUA (RFA, 2024). Produzido a partir de culturas a base do açúcar de amido, incluindo a cana-de-açúcar, beterraba, sorgo sacarino, milho, trigo, cevada, batata, inhame e mandioca, no Brasil, o sucesso da sua utilização se deve, principalmente, pela cana-de-açúcar. O país ocupa a primeira posição como produtor e consumidor de etanol a partir desse tipo de cultura (Machado e Abreu, 2016).

O etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, é considerado um combustível limpo porque sua produção e uso resultam em uma pegada de carbono significativamente menor em comparação com os combustíveis fósseis. A combustão do etanol emite CO_2 , mas a cana-de-açúcar também o absorve durante seu crescimento, criando um ciclo de carbono mais sustentável (Vidal de Barros, 2023). Esse ciclo de carbono "neutro" torna o etanol uma escolha atraente para uso em motores híbridos, que podem combinar a eficiência dos motores elétricos com a flexibilidade do etanol (Santos e Ferreira, 2022).

O desenvolvimento do etanol como combustível está profundamente ligado à crise do petróleo nos anos 1970, que levou o governo brasileiro a promover esse biocombustível como uma alternativa à gasolina. O Programa Nacional do Álcool (Proálcool) foi um marco nesse processo, estabelecendo uma infraestrutura robusta para a produção e distribuição em todo o país. Essa infraestrutura, que inclui vastas plantações de cana-de-açúcar, usinas de produção de etanol e uma rede de distribuição de combustíveis, criou as condições para o Brasil se tornar o maior produtor e consumidor de etanol do mundo (Vidal de Barros, 2023).

4.4.2 Motores híbridos a etanol: tecnologia e benefícios

Os motores híbridos a etanol combinam um motor elétrico com um motor de combustão interna que usa etanol como combustível. Esta configuração permite que o veículo opere em modo elétrico em situações em que a eficiência energética é

crucial, como em áreas urbanas ou durante a condução em baixa velocidade, e utilize o motor a etanol para fornecer potência adicional quando necessário, como em viagens longas ou quando a bateria está descarregada (Reis e Silva, 2017).

Ao contrário dos motores híbridos tradicionais, que geralmente usam gasolina, os motores híbridos a etanol podem operar com um combustível que não apenas reduz as emissões durante a combustão, mas também contribui para um ciclo de carbono mais sustentável (Vidal de Barros, 2023). Também, a utilização de etanol em motores híbridos pode ajudar a mitigar um dos principais desafios enfrentados pelos VEs no Brasil: a falta de infraestrutura de recarga. Embora o país tenha uma infraestrutura de etanol bem desenvolvida, a rede de estações de recarga para VEs ainda é limitada, especialmente fora dos grandes centros urbanos. Assim, o uso de etanol como combustível complementar permite que os veículos híbridos ofereçam maior autonomia e flexibilidade, sem depender exclusivamente de estações de recarga (Reis e Silva, 2017).

4.4.3 Viabilidade, desafios e perspectivas para o futuro.

A adoção em larga escala de motores híbridos a etanol no Brasil depende de vários fatores, incluindo o desenvolvimento contínuo de tecnologias de motores híbridos, a disponibilidade de incentivos governamentais e a aceitação do mercado. Um dos principais desafios é o custo de desenvolvimento e produção desses motores. Embora o etanol seja um combustível relativamente barato e amplamente disponível no Brasil, a integração dessa tecnologia em veículos híbridos requer investimentos significativos em pesquisa e desenvolvimento (Vidal de Barros, 2023).

Existem desafios técnicos associados ao uso de etanol em climas frios, onde o etanol pode congelar mais facilmente do que a gasolina. Isso limita o uso de veículos híbridos a etanol em regiões mais frias, embora esse problema seja menos relevante no Brasil, que possui um clima predominantemente tropical (Reis e Silva, 2017). No Brasil, a continuidade dos subsídios governamentais e a expansão da infraestrutura de recarga serão essenciais para garantir que os VEs e híbridos possam competir em pé de igualdade com os veículos tradicionais (Ramos *et al.*, 2012).

As perspectivas para o futuro dos VEs e híbridos são promissoras, especialmente à medida que a tecnologia continua a evoluir e os custos associados a

esses veículos diminuem. A expectativa é que, com o avanço das tecnologias de baterias, como as de íon-lítio e de estado sólido, e o aumento da infraestrutura de recarga, os VEs se tornem gradativamente mais acessíveis e prevalentes (Silva, 2023).

A transição para uma frota predominantemente elétrica não apenas contribuirá para a redução das emissões de GEE, mas também para a criação de uma economia mais sustentável e menos dependente de combustíveis fósseis, contribuindo para a descarbonização (Ramadhas, 2016; Vernalha e Seixas, 2022). Entretanto, à curto prazo, a combinação de um motor elétrico com um motor a etanol poderá oferecer aos consumidores brasileiros uma solução de transporte eficiente e ambientalmente responsável, sem exigir a imediata implementação de uma infraestrutura de recarga elétrica em todo o território nacional. Com a infraestrutura de etanol já bem estabelecida e um forte histórico de inovação na indústria automotiva, o Brasil está bem posicionado para liderar o desenvolvimento e a implementação de motores híbridos a etanol. À medida que o mundo se volta cada vez mais para soluções de transporte sustentável, o etanol, em combinação com a tecnologia híbrida, pode desempenhar um papel crucial na transição energética do Brasil (Reis e Silva, 2017).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante de um cenário em que os VEs estão em plena expansão, cresce também a hesitação dos consumidores em adotá-los, na maioria das vezes motivada pela falta de infraestrutura de carregamento, tempo de recarga, baixa autonomia, e a dúvida em relação ao modo de produção das baterias. Nesse contexto, os veículos híbridos movidos a etanol vêm demonstrando ser a opção mais eficaz, acessível e melhor estruturada na redução das emissões de carbono na atmosfera, à curto prazo, porque resolvem boa parte dessas questões, principalmente quanto a infraestrutura de carregamento e a redução da utilização de matérias primas para a produção de baterias.

Embora os VEs reduzam as emissões durante sua operação, a produção e o descarte das baterias, principalmente de íon-lítio, apresentam desafios ambientais significativos. Por outro lado, os motores híbridos utilizando etanol têm o benefício de aproveitar um biocombustível produzido a partir de fontes renováveis, como a cana-de-açúcar, que durante o seu crescimento participa ativamente no processo de captura de CO₂ da atmosfera, contribuindo para uma matriz energética mais sustentável. Além disso, não necessitam de uma infraestrutura de carregamento, não sobrecarregam o sistema elétrico e a utilização de baterias nos veículos híbridos é naturalmente reduzida, basicamente pela necessidade de compartilhar espaço para que haja armazenamento de biocombustível.

Até que novas tecnologias de armazenamento de energia menos poluentes sejam desenvolvidas, no intuito de substituir as baterias tradicionais, e uma infraestrutura adequada para recarga se consolide, utilizando fontes energéticas integralmente limpas, os veículos híbridos movidos a etanol representarão uma alternativa intermediária no caminho para a adoção definitiva dos VEs, reduzindo o impacto ambiental e as emissões dos GEE.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, J. C. A. **Análise dos Carros Elétricos, Híbridos e a Hidrogênio**. Revista FT, São Paulo, 8 abr. 2024. Disponível em: <https://revistaft.com.br/analise-dos-carros-eletricos-hibridos-e-a-hidrogenio/>. Acesso em: 3 ago. 2024.
- CABRAL NETO, J. P.; SANTOS, S. M.; PIMENTEL, R. M. M. **Infraestrutura energética brasileira, perspectivas e desafios para o suporte aos veículos elétricos**. Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v. 12, n. 1, p. 385-396, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.001.0032>
- CHRISPIM, Mariana Cardoso; SOUZA, Jhonathan Fernandes Torres de; SIMÕES, André Felipe. **Avaliação comparativa entre veículos elétricos e veículos convencionais no contexto de mitigação das mudanças climáticas**. Revista de Gestão Sustentável Ambiental, Florianópolis, v. 8, n. 1, p. 127-148, jan./mar. 2019. DOI: 10.19177/rgsa.v8e12019127-148.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2021**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-688/NT-EPE-DPG-SDB-2022-02_Analise_de_Conjuntura_dos_Biocombustiveis_2021.pdf. Acesso em: 3 ago. 2024.
- FERREIRA, José Paulo; DIAS, Márcio José. **Veículos Elétricos e Híbridos: História e Perspectivas para o Brasil**. Revista ETIS - Journal of Engineering: Technology, Innovation and Sustainability, 2022.
- FREITAS, F. T.; MARCHESINI, M. M. P. **Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) das baterias de lítio utilizadas nos veículos elétricos**. Produto & Produção, vol. 23, n.3, p. 1-20, 2022.
- INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). **Comparação Das Emissões De Gases De Efeito Estufa No Ciclo De Vida De Veículos No Brasil**. Washington, D.C.: ICCT, 2023. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/10/Brazil-LDV-LCA-report-A4-PORT-v4.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2024.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework**. Geneva: ISO copyright office, 2006a. 21 p.
- MACHADO, C. M. M.; ABREU, F. R. **Produção de álcool combustível a partir de carboidratos**. Revista política agrícola. v.3, p.64 – 78. 2006.
- LUKIC, S. M. et al. **Energy Storage Systems For Automotive Applications**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Nova Iorque, v.55, n.6, p.2258-2267, 2008. Disponível em: <http://doi.org/10.1109/TIE.2008.918390> Acesso em: 31 ago. 2024.

RAMADHAS, A. S. **Alternative Fuels for Transportation**. Boca Ratón: CRC Press - Taylor & Francis Group, 2016.

RAMOS, D. F. et al. **Estado da Arte da Obtenção de Crédito de Carbono via Adoção de Veículo Elétrico**. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, v. 8, n. 3, p. 342-356, 2012.

REIS, S. R.; SILVA, E. A. **Motores Elétricos Flex a Etanol: Uma Nova Era no Setor Automotivo Mundial**. Revista de Ciência Exata e Tecnologia, v. 12, n. 12, p. 45-48, 2017.

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION (RFA). **Annual Ethanol Production**. 2024. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>. Acesso em: 5 out. 2024.

SANTOS, F. T. ; FERREIRA, M. M. P. **Análise do Ciclo de Vida de Veículos Convencionais, Elétricos e Híbridos Plug-in para Condições Brasileiras**. Produto & Produção, vol. 23, n.3, 2022.

SILVA, G. L.; XAVIER, Y. M. A.; BEZERRA, J. M. N. S. **A Função Indutora da Tributação como Ferramenta Viabilizadora da Instalação de uma Montadora de Veículos Elétricos no Nordeste Brasileiro**. Revista de Direito, Economia e Desenvolvimento Sustentável, v. 8, n. 1, p. 77-93, 2022.

SILVA, M. B.. **Influência da Mobilidade Elétrica na Redução da Emissão de Poluentes**. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.9, n.5, p. 17109-17115, 2023.

SILVESTRE, Raylander Firmo. **Evolução dos veículos elétricos: da história movida aos motores de combustível fóssil ao futuro sustentável com o funcionamento dos motores elétricos**. Contribuciones a Las Ciencias Sociales, São José dos Pinhais, v. 17, n. 4, p. 01-12, 2024.

SUGAHARA, C. R. **Mudanças climáticas e veículos elétricos: alternativas**. Revista de Engenharia e Inovação, Santo André, v. 5, n. 2, p. 45-60, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufabc.edu.br/index.php/reni/article/view/655/443>. Acesso em: 3 ago. 2024.

VERNALHA, E. B. R., & SEIXAS, S. R. C. **Alternativas para Mobilidade Urbana Sustentável: Comparação entre Veículo Elétrico a Bateria Íon-Lítio e a Célula a Combustível (Utilizando ACV)**. Revista Brasileira de Energia, 2022.

VIDAL DE BARROS, T. N. G. **Motores Elétricos a Etanol: Um Futuro Sustentável na Indústria Automobilística Brasileira**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, 2023.

VIDAL DE BARROS, T. N. G. **Sustentabilidade Veicular: O Uso de Veículos Elétricos e Híbridos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, 2022.

WOODROFFE, G.; CORBIN, H. **Guyana's Transition to Electric Vehicles: A Systematic Review from the Perspective of Developing Countries**. Paper do NAEA, 2023, Volume 1, Nº 1, p. 1-20.

WORLD WIDE FUND FOR NATURE (WWF). **As Mudanças Climáticas**. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/clima/mudancas_climaticas2/ Acesso em: 3 set. 2024.