

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS E RELAÇÕES INTERNACIONAIS

LUARA TEODORO BORBA

**ELETRIFICAÇÃO VEICULAR NO BRASIL: DESAFIOS INSTITUCIONAIS E DE
INFRAESTRUTURA**

Uberlândia

2025

LUARA TEODORO BORBA

**ELETRIFICAÇÃO VEICULAR NO BRASIL: DESAFIOS INSTITUCIONAIS E DE
INFRAESTRUTURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciências Econômicas e Relações Internacionais da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Economia.

Orientador: Bruno Benzaquen Perosa

Uberlândia

2025

LUARA TEODORO BORBA

**ELETRIFICAÇÃO VEICULAR NO BRASIL: DESAFIOS INSTITUCIONAIS E DE
INFRAESTRUTURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Economia e Relações Internacionais da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Ciências Econômicas.

Uberlândia, 05 de setembro de 2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Bruno Benzaquen Perosa
(Orientador)

Prof. Dr. Clésio Marcelino de Jesus

Prof.a Dra. Marisa dos Reis Azevedo Botelho

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Iron Teodoro Portugues e Rossana Claudia Borba Portugues. A dedicação e o apoio incondicional deles foram fundamentais para que eu pudesse trilhar este caminho de aprendizado e concluir este trabalho. Pelo incentivo, pelos conselhos valiosos e pela presença constante em cada etapa da minha jornada acadêmica, minha eterna gratidão.

Ao meu namorado, Carlos Eduardo Marques de Macedo Filho, meu reconhecimento de coração por seu apoio incondicional. Sua presença e apoio foram cruciais na execução deste trabalho e nas escolhas que fiz ao longo do processo de formação.

Sou também imensamente grata a todos os professores que me guiaram durante essa trajetória. Em especial, ao meu orientador, Bruno Benzaquen Perosa, por sua confiança e por toda a sua orientação, que tornou a escrita deste trabalho uma experiência enriquecedora.

Um agradecimento especial também aos professores Carlos Alves do Nascimento, Clésio Marcelino de Jesus, Germano Mendes de Paula, Júlio Fernando Costa Silva, Marisa dos Reis Azevedo Botelho, Raquel de Azevedo e Soraia Aparecida Cardoso. As aulas e a dedicação de cada um deles foram essenciais para a minha formação e para moldar a profissional que sou hoje.

Por fim, agradeço à minha família, aos amigos e aos colegas de turma. Vocês tornaram a minha graduação grandiosa e inesquecível.

RESUMO

A preocupação global com a emissão de gases poluentes e a “descarbonização” no setor de transportes automotivos está cada vez mais presente nos debates econômicos. Nesse contexto, diversas alternativas sustentáveis, como os veículos elétricos e os biocombustíveis, foram inseridas na transição energética do setor. O presente estudo, por meio de uma metodologia que combina análises qualitativa e quantitativa e uma revisão da literatura, busca compreender se a eletrificação veicular é, de fato, a solução mais adequada para o Brasil, ou se um modelo complementar com os biocombustíveis seria mais eficaz. O trabalho conclui que a eletrificação em larga escala será impactada pelas configurações institucionais da matriz de biocombustíveis existente e pela precária infraestrutura de recarga do país. Desse modo, o estudo sugere que a solução mais eficaz para a realidade brasileira reside em um modelo complementar, que aproveite tanto as oportunidades com biocombustíveis tradicionais (etanol, biodiesel) e inovações (hidrogênio verde, etanol de segunda geração) quanto a tecnologia híbrida, para uma transição gradual e alinhada às particularidades nacionais.

Palavras-chave: veículos elétricos; transição energética; biocombustíveis.

ABSTRACT

Global concern with the emission of polluting gases and the so-called "decarbonization" in the automotive transportation sector is increasingly present in economic debates. In this context, various sustainable alternatives, such as electric vehicles and biofuels, have been introduced into the sector's energy transition. The present study, through a methodology that combines qualitative and quantitative analyses and a literature review, seeks to understand whether vehicle electrification is, in fact, the most suitable solution for Brazil, or if a complementary model with biofuels would be more effective. The work concludes that large-scale electrification will be impacted by the institutional configurations of the existing biofuels matrix and the precarious charging infrastructure of the country. Thus, the study suggests that the most effective solution for the Brazilian reality lies in a complementary model that takes advantage of both the opportunities with traditional biofuels (ethanol, biodiesel) and innovations (green hydrogen, second-generation ethanol), as well as hybrid technology, for a gradual transition aligned with national particularities.

Keywords: electric vehicles; energy transition; biofuels.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Histórico de emissões de gases poluentes entre 1900 e 2022 (em MtCO2e).....	24
Gráfico 2: Emissões de CO2 por País, 2022 (em MtCO2e)	26
Gráfico 3: Trajetória do Valor da Produção da Cana-de-Açúcar no Brasil*.....	31
Gráfico 4: Distribuição percentual do consumo total de energia por setor, com base em Mtep, em 2023.....	32
Gráfico 5: Trajetória da Produção Global de Etanol por região entre 2007 e 2024	32
Gráfico 6: Ranking mundial dos principais países produtores de biocombustíveis em 2023	33
Gráfico 7: Maiores consumidores de petróleo e líquidos de gás natural em 2021 (mil barris por dia).....	34
Gráfico 8: Matriz energética mundial (em %)	34
Gráfico 9: Matriz energética brasileira (em %)	35
Gráfico 10: Número de licenciamentos de autoveículos novos à etanol entre 1979 e 1995	37
Gráfico 11: Número de licenciamentos de autoveículos novos flex fuel x taxa de crescimento entre 2003-2009.....	38
Gráfico 12: Participação das fontes energéticas no setor de transportes em 2023	39
Gráfico 13: Emissões Evitadas com Bioenergia entre 2019 e 2023 (em MtCO2)	39
Gráfico 14: Composição da fonte de geração elétrica brasileira em 2022 (em %)	44
Gráfico 15: Série histórica de vendas de veículos leves eletrificados no Brasil.	47
Gráfico 16: Evolução da quantidade de eletropostos no Brasil entre 2020 e 2025	57
Gráfico 17: Comparação da evolução do número de estações de Recarga de Veículos Elétricos entre China e Brasil.....	58

LISTA DE ABREVIAÇÕES

- ABVE – Associação Brasileira do Veículo Elétrico
- ACV – Avaliação do Ciclo de Vida
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores
- ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
- BEVs – *Battery Electric Vehicles*
- BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
- CBIOs – Créditos de Descarbonização
- CFP – Comissão de Financiamento da Produção
- CNUMAD – Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento
- CO – Monóxido de Carbono
- CO₂ – Dióxido de Carbono
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
- DSK – *Dvorak Simplified Keyboard*
- E1G – Etanol de Primeira Geração
- E2G – Etanol de Segunda Geração
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- FCEVs – *fuel cell electric vehicles*
- FENABRE – Federação Nacional de Distribuição de Veículos Automotores
- FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos
- GEE – Gases de efeito estufa
- HC – Hidrocarbonetos
- IAA – Instituto do Açúcar e do Álcool
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IBP – Instituto do Brasileiro de Petróleo e Gás
- ICCT – *International Council on Clean Transportation*
- IEA – Agência Internacional de Energia
- IPVA – Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores
- MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
- MME – Ministério de Minas e Energia

NiMH – Níquel-Hidreto Metálico

NOx – Óxidos de Nitrogênio

NIB – Nova Indústria Brasil

PEVs – *Plug-in Electric Vehicles*

PNPB – Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel

PROÁLCOOL – Programa Nacional do Álcool

PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

PRVE – Problema de Roteamento de Veículos Elétricos

SAF – *Sustainable Aviation Fuel*

SNCR – Sistema Nacional de Crédito Rural

STI – Sistemas Tecnológicos de Inovação

ÚNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar e Bioenergia

UNFCCC – Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

VEs – Veículos Elétricos

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
CAPÍTULO 1: DINÂMICAS SOCIOTÉCNICAS E INSTITUCIONAIS NA DEFINIÇÃO DA TRAJETÓRIA TECNOLÓGICA	14
1.1 Inovações Tecnológicas e as Redes Sociotécnicas	14
1.1.1 Papel do Crédito e do Estado	18
1.2 <i>Path dependence</i>	20
1.2.1 <i>Path Dependence</i> Tecnológica	21
1.2.2 <i>Path Dependence</i> Institucional	23
1.3 Institucionalização do Desenvolvimento Sustentável e Eco-inovação.....	24
CAPÍTULO 2: PARTICULARIDADES DA MATRIZ BIOENERGÉTICA BRASILEIRA.....	29
2.1 Setor sucroenergético.....	29
2.2 Biocombustíveis.....	31
2.2.1 História dos Biocombustíveis	35
2.2.2 Proconve	40
2.2.3 RenovaBio	40
2.2.4 Lei do Combustível do Futuro	41
2.2.5 Nova Indústria Brasil (NIB)	42
2.3 Oportunidades.....	42
2.3.1 Diesel Verde	43
2.3.2 Etanol de Segunda Geração (E2G)	43
2.3.3 Hidrogênio Verde	44
CAPÍTULO 3: DESAFIOS PARA A ELETRIFICAÇÃO VEICULAR NO BRASIL	46
3.1 História dos VEs	46
3.2 Características e comparações	47

3.2.1 Ciclo de vida do CO2.....	49
3.3 Limitações para a expansão dos VEs.....	52
3.3.1 Limitações institucionais	52
3.3.2 Limitações de infraestrutura	56
3.3.3 Baterias como um entrave.....	59
3.4 Alternativa: Veículos híbridos <i>flex</i> a etanol.....	60
CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

INTRODUÇÃO

O setor de transportes no Brasil é um dos principais responsáveis pelo consumo de energia e pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), sendo ainda amplamente dependente de fontes fósseis (EPE, 2022). Dessa forma, frente às exigências globais de descarbonização, cresce a tendência de eletrificação da frota automotiva como alternativa sustentável (IEA, 2023).

No entanto, a matriz energética e veicular brasileira apresenta especificidades: o país possui uma forte matriz de biocombustíveis – consolidada, principalmente, por meio de políticas agroindustriais voltadas ao setor sucroenergético –, o que contribui para a redução de emissões sem depender exclusivamente da eletrificação (Shikida e Perosa, 2012).

Além disso, como a maior parte dos países, o Brasil carece de infraestrutura de recarga necessária para a adoção em larga escala dos veículos elétricos, além de enfrentar dificuldades institucionais relacionadas a grupos de interesses (Wolffenbuttel, 2022). A produção e descarte das baterias, e a alta demanda energética requisitada pelo consumo em grande escala dessa nova tecnologia também representam importantes entraves.

Esses empecilhos e a singularidade da matriz brasileira levantam um questionamento central: a eletrificação veicular é, de fato, a melhor solução para o Brasil, ou seria mais eficaz investir em um modelo complementar com biocombustíveis? Essa reflexão orienta o presente estudo, que busca compreender os desafios e caminhos possíveis para uma transição energética adaptada à realidade nacional.

Ao considerar sustentabilidade, custos, infraestrutura e trajetória institucional, a pesquisa visa contribuir para o debate sobre as políticas públicas no setor automotivo e fortalecer iniciativas que promovam a descarbonização sem desconsiderar as soluções já existentes, como os biocombustíveis, que possuem vantagens competitivas e institucionais no país.

Os objetivos específicos envolvem: (i) estudar os marcos teóricos da inovação, sua trajetória institucional e os principais conceitos sobre o desenvolvimento sustentável; (ii) avaliar a relevância histórica e institucional da matriz renovável brasileira; (iii) analisar comparativamente os modelos elétrico e bioenergético; (iv) apresentar as principais dificuldades para a eletrificação dentro de uma análise

comparativa com os países China e Estados Unidos; e (v) discutir políticas públicas e alternativas tecnológicas viáveis para uma transição gradual e sustentável.

A metodologia combina análise qualitativa e quantitativa, com base em dados secundários extraídos de relatórios institucionais e empresariais, como os da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), e em estudos e artigos acadêmicos publicados em sites como Google Acadêmico e Scielo. Além disso, a pesquisa adota abordagem indutiva, com foco na compreensão dos impactos econômicos e estruturais da transição veicular no Brasil.

O trabalho está estruturado em três capítulos: o primeiro discute os fundamentos institucionais e teóricos da inovação, rede de atores, dependência de trajetória e desenvolvimento sustentável; o segundo explora o desenvolvimento da matriz bioenergética nacional (setor sucroenergético e dos biocombustíveis) e oportunidades bioenergéticas; e o terceiro analisa as características e evolução dos veículos elétricos, bem como os obstáculos técnicos e institucionais à sua aplicação em larga escala, apresentando alternativas integradas de transição energética.

CAPÍTULO 1: DINÂMICAS SOCIOTÉCNICAS E INSTITUCIONAIS NA DEFINIÇÃO DA TRAJETÓRIA TECNOLÓGICA

Este capítulo discute como diferentes abordagens teóricas ajudam a compreender os desafios da integração da eletrificação veicular no Brasil, destacando a relação entre as inovações tecnológicas, redes de atores, instituições e dependências de trajetória. Além disso, são explicados conceitos de inovação importantes relacionados ao desenvolvimento sustentável, bem como a importância da sua institucionalização.

1.1 Inovações Tecnológicas e as Redes Sociotécnicas

As inovações desempenham um papel fundamental no aumento da produtividade e na elevação da competitividade de empresas, regiões e nações, constituindo-se como elementos-chave para o desenvolvimento econômico (Schumpeter, 1982; Tigre, 2006).

De maneira abrangente, a inovação pode ser compreendida como o resultado do uso intensivo da informação e do conhecimento, os quais assumem um papel central na reconfiguração da estrutura produtiva. Isso se dá por meio da introdução de novos produtos, processos e modelos organizacionais com maior valor agregado, promovendo a sofisticação das atividades econômicas e ampliando sua capacidade de competir em mercados dinâmicos e globalizados (Schumpeter, 1982; Tigre, 2006).

Elas podem ser classificadas em: (i) radicais, que rompem com paradigmas e transformam setores inteiros, como os veículos elétricos; e (ii) incrementais, que promovem melhorias graduais em processos existentes, como os biocombustíveis (Duguet, 2006).

Do ponto de vista do crescimento de setores, quando uma inovação produz impactos econômicos abrangentes significa dizer que ela difunde em grau elevado entre empresas, setores e regiões, desencadeando novos empreendimentos e expandindo mercados (Tigre, 2006).

“(...) Schumpeter adota uma concepção abrangente de inovação, associando-a a tudo que diferencia e cria valor a um negócio. Isso inclui, além do desenvolvimento de novos produtos e processos, as atividades de criação de um novo mercado antes inexistente, a exploração de uma nova fonte de suprimentos e a reestruturação dos métodos de organização.” (Tigre, 2006, p. 87)

A partir desse caráter amplo, diversas escolas de pensamento realizaram análises e estudos com o objetivo de explicar como surgem e se modificam as inovações ao longo do tempo. Nesse cenário, a abordagem econômica em conjunto com a biologia evolucionista nasce através de Marshall, que propõe a utilização de conceitos derivados da “*hard science*”, como a biologia e física, para explicar a complexidade das ciências econômicas (Tigre, 2006).

Dessa forma, a corrente de pensamento evolucionista – posteriormente denominada neo-schumpeteriana – passou a ser amplamente empregada por diversos economistas como um referencial conceitual para explicar os fatores que impulsionam as transformações na estrutura das economias ao passar do tempo (Tigre, 2006).

Nesse contexto, a contribuição de Giovanni Dosi, proeminente autor da escola neo-schumpeteriana, assume relevância central ao transcender as abordagens tradicionais e focar nas forças endógenas que moldam o progresso tecnológico. Em seu estudo seminal, "*Technological Paradigms and Technological Trajectories*" (1981), Dosi propõe uma estrutura analítica que posiciona a inovação no cerne da dinâmica capitalista, oferecendo uma compreensão mais matizada e sistêmica do processo.

Para Dosi, o avanço tecnológico não é um evento aleatório ou um mero resultado de forças de mercado ou descobertas científicas isoladas. Em vez disso, ele é um processo cumulativo e orientado por paradigmas tecnológicos. O autor define um paradigma tecnológico como um conjunto de pressupostos, problemas relevantes e conhecimentos específicos que guiam a atividade de pesquisa e desenvolvimento em uma determinada área. Essa estrutura funciona como uma espécie de "matriz" que define a direção e os limites da inovação.

Dentro desse paradigma, o progresso segue trajetórias tecnológicas, que representam os caminhos de melhoria e inovação incremental. Ou seja, as inovações tendem a seguir uma lógica interna, construindo-se sobre o conhecimento e as práticas existentes. Esse modelo teórico rompe com a visão simplista de que a inovação é um processo linear e previsível, destacando seu caráter complexo, incerto e socialmente condicionado (Dosi, 1981).

A análise de Dosi também revisita a clássica dicotomia entre as teorias *demand-pull* e *technology-push*, que tentam explicar as forças motrizes da inovação. Enquanto a abordagem *demand-pull* argumenta que a inovação é impulsionada pela demanda do mercado, a *technology-push* sustenta que ela é um resultado da evolução do

conhecimento científico. Dosi, contudo, sugere que essa dicotomia é insuficiente para capturar a complexidade do fenômeno.

Assim, em sua perspectiva, tanto a demanda quanto o avanço científico são importantes, mas sua interação é mediada pelo paradigma tecnológico. O paradigma atua como um filtro que seleciona quais demandas são tecnicamente viáveis e quais avanços científicos são economicamente relevantes. Dessa forma, o progresso tecnológico é um resultado da interação dinâmica entre o potencial do conhecimento e as necessidades e incentivos do mercado, moldados e direcionados pelo paradigma predominante (Dosi, 1981).

Nesse mesmo movimento teórico, intensificam-se as abordagens de natureza institucional que, incorporando uma perspectiva sistêmica, passam a analisar as interações entre as firmas e seu ambiente externo como elementos condicionantes do desempenho inovativo e da competitividade empresarial (Tigre, 2006). Essa abordagem reforça a noção de que o processo inovador está enraizado em estruturas sociais, institucionais e organizacionais específicas.

Nesse âmbito, Callon (1987) apresenta a Teoria Ator-Rede (TAR), ou também, a chamada Sociologia da Tradução, como abordagem teórico-metodológica para entender o mercado de automóveis elétricos em seu país de origem, a França. Assim, em seu estudo ele explica como as inovações emergem e se desenvolvem por meio de processos contínuos de tradução entre grupos heterogêneos. Ou seja, ele mostra como atores humanos e não-humanos se associam em redes e negociam constantemente, resultando em inovações técnicas.

Dessa maneira, a teoria investiga as associações entre diferentes atores e como seus papéis são definidos e redefinidos ao longo de um processo de negociação. O autor defende que a tecnologia é o resultado provisório dessas associações em rede, permeadas por incertezas e controvérsias técnicas e sociais, sendo determinantes para o sucesso ou não dessas inovações. Assim, pode-se afirmar que uns atores se tornam mais poderosos/influentes do que outros no processo (Callon, 1987).

À luz desse cenário, Andrade (2006) ressalta a ideia de que a inovação, ao contrário do significado convencional, é um fenômeno socioeconômico complexo, resultante da interação entre avanços tecnológicos e instituições sociais. Ou seja, não decorre apenas de interesses econômicos e pela introdução de novos produtos, mas do direcionamento de atores estratégicos inseridos em redes dinâmicas que influenciam e são influenciados pelo processo.

“A escolha de determinadas tecnologias e a recusa de outras não se baseia em critérios puramente econômicos ou racionais, mas sim na compatibilização envolvendo crenças e interesses dos diversos grupos e setores estratégicos que se encontram na atividade tecnológica” (Andrade, 2006, p. 145).

Assim, o conjunto de circunstâncias técnicas e sociais que envolve empresas, o Estado e universidades são denominados redes de instituições que exercem papel estritamente importante para o avanço de inovações tecnológicas ao definirem regras específicas (Andrade, 2006). Nessa perspectiva, essa rede de interesses domina e comanda o caminho pelo qual as inovações irão caminhar.

No entanto, por consequência dessas redes, Andrade (2006) apresenta as limitações para uma eficiência produtiva que envolve a “colonização” dos caminhos de inovação, uma vez que, esse grupo de interesses dominante estabelece um ambiente institucional favorável para o avanço de inovações tecnológicas para um determinado tipo de setor ou produto, o que resulta em uma exclusão de outros tipos de avanços inovativos. Callon (1987) retrata bem essa concentração de benefícios oferecidas por uma rede de atores alinhada para um determinado tipo de tecnologia específica:

“Se os usuários de automóveis rejeitam o veículo elétrico e mantêm suas preferências por diferentes tipos do automóvel tradicional, isso se dá por uma série de motivos, um dos quais é o problema de que os catalisadores se envenenam. São essas associações heterogêneas que os sociólogos não levam em consideração e que são responsáveis pelo sucesso de uma rede de atores específica (...)” (Callon, 1987, apud Andrade, 2006, p. 161)

Assim, ao impor padrões e projeções de resultados, e localizar toda a procura de uma produção eficiente em um setor e conjuntura econômica específicos, torna-se difícil conceber um futuro tecnológico aberto a avanços disruptivos, característicos do próprio desenvolvimento técnico (Andrade, 2006).

Dessa forma, segundo Wolffenbuttel (2022) o seu estudo sobre o Sistemas Tecnológicos de Inovação (STI), cria-se um ambiente de embate e disputa de poder, em que o alinhamento estratégico garante a estabilidade do mercado e protege os interesses locais, sobretudo na cadeia de valor do setor de escolha do grupo dominante.

No entanto, esse alinhamento estratégico não depende apenas de normativas jurídicas, mas, principalmente, da habilidade de articulação entre os atores envolvidos.

Dessa forma, somente com uma forte articulação é possível a construção de redes colaborativas, o engajamento com atores-chave e a constituição de coalizões de suporte tecnológico, direcionadas à formulação de políticas públicas que incentivem o avanço de processos inovadores (Wolffenbuttel, 2022).

Conclui-se que, nesse processo, cada ator busca influenciar e moldar o desenvolvimento tecnológico conforme seus interesses, formando redes sociotécnicas complexas e dinâmicas (Callon, 1987). Nesse cenário, as estratégias de *lobby* das montadoras junto ao governo para obter incentivos fiscais, as políticas públicas de descarbonização, os investimentos em infraestrutura de recarga e as pressões ambientais criam um cenário de constante tradução, em que papéis, interesses e alianças são redefinidos ao longo do tempo.

Contudo, além desses instrumentos institucionais, aspectos que envolvem o financiamento de tecnologias também são relevantes no ambiente de transição energética incremental e disruptiva, como será apresentado a seguir.

1.1.1 Papel do Crédito e do Estado

As contribuições do Schumpeter e dos neo-schumpeterianos foram além dos conceitos e das explicações para as transformações e relações sociotécnicas. Elas também buscaram entender como as difusões se sustentavam financeiramente no ambiente econômico.

O importante papel do crédito para o financiamento das inovações – e da indústria como um todo — foi enfatizado pelo Schumpeter (1982), quando ele afirmou que o mercado de capitais se estabeleceria como a principal fonte para a realização da combinação de fatores necessários para a produção.

Nesse sentido, o autor favorece o juro como essencial para o processo de desenvolvimento industrial e para aqueles que inovam, e que somente o empreendedor recorrerá a ele, já que ele é o único inovador a se pensar.

“(...) Ninguém além do empreendedor necessita de crédito; (...) o crédito serve ao desenvolvimento industrial.” (Schumpeter, 1982, p. 100).

Schumpeter (1982) também comenta sobre a reação externa em relação àqueles que desejam realizar ou produzir algo novo, uma reação que pode se manifestar na existência de impedimentos legais ou políticos, ou até mesmo em condenações de

determinados grupos sociais – o que segundo ele, depende se tal grupo está acostumado com mudanças ou não.

“Mesmo um desvio do costume social em coisas como a vestimenta ou os costumes despertam oposição, e é claro que essa será maior nos casos mais graves. Essa oposição é maior nos estágios primitivos da cultura do que nos outros, mas não está nunca ausente” (Schumpeter, 1982, p. 93).

Nesse âmbito, Callon (1987) afirma que a superação de incertezas e controvérsias pelos negociadores durante o trajeto de negociação é necessária para que a inovação se consolide, assim como a forte associação entre os atores.

Dessa forma, além de se compreender o papel crucial do financiamento sobre as inovações, é muito relevante entender que é necessário que exista e prevaleça a ação de algum agente regulador capaz de mitigar preconceitos e opiniões sem fundamentos científicos através da propagação de conhecimento e educação.

Dentro desse ciclo, a teoria de Mazzucato (2014) se apresenta como um instrumento que reconhece o papel do Estado na sustentação e direcionamento das mudanças institucionais, propondo-o como o agente regulador ao qual Schumpeter se referiu.

Segundo a autora, ao agir como um agente inovador e dinâmico, o Estado contribui para a evolução das tecnologias e inovações, assumindo riscos que o setor privado não enfrenta e liderando investimentos estratégicos de longo prazo, como as tecnologias verdes – aquelas inovações focadas em energia limpa e sustentável (como solar e eólica), que demandam investimento estatal ousado de longo prazo para transformar padrões de produção e consumo, e, ainda, possibilitar crescimento econômico aliado à sustentabilidade ambiental.

O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) é um exemplo no contexto brasileiro que mostra como o Estado, ao fortalecer instituições e impulsionar setores inovadores, atua como parte do próprio processo de dependência de trajetória, moldando os rumos do desenvolvimento econômico (Mazzucato, 2014).

Esses elementos facilitam a compreensão do surgimento das inovações e quais as reações na sociedade irão colaborar com a compreensão do poder das redes de interesses e do conceito de *path dependence* – já que as trajetórias históricas e institucionais limitam as possibilidades de inovação tecnológica.

1.2 *Path dependence*

Ao considerar a ausência de uma abordagem que integre o ambiente setorial e nacional em que as inovações ocorrem, North (1990) aprimora o conceito de inovação de Schumpeter, e apresenta os aspectos institucionais que estão presentes no ambiente econômico, influenciando o seu comportamento e desenvolvimento (Tigre, 2006).

Assim, ao longo da história, Douglass C. North explicou como instituições, organizações e nações se transformam a partir da interação entre elas, gerando novas matrizes institucionais que influenciam fortemente o desempenho econômico e tecnológico. Nesse sentido, ele introduz a ideia de que, uma vez escolhido um determinado padrão tecnológico, este tende a gerar retornos crescentes — ou seja, as decisões do presente são moldadas por escolhas realizadas no passado (North, 1990).

“A mudança tecnológica e a mudança institucional são as chaves básicas para a evolução social e econômica, e ambas apresentam característica de dependência da trajetória. Um único modelo pode explicar tanto a mudança tecnológica quanto a institucional? Elas têm muito em comum, Retornos crescente são um elemento especial em ambas.” (North, 1990, p. 103; Tradução Própria).

Assim, o conceito de *path dependence*, adotado na literatura brasileira a partir do inglês, refere-se à dependência da trajetória e é utilizado para explicar como decisões passadas influenciam em decisões políticas e de inovação no presente. Esse fenômeno ocorre devido à consolidação de trajetórias tecnológicas e institucionais ao longo do tempo, resultando em um efeito cumulativo conhecido como “bola de neve”.

Dessa forma, o conceito se relaciona diretamente com a teoria evolucionária, que estuda as difusões tecnológicas e seus impactos na sociedade, ao representar que, ao decorrer do tempo, “sementes” são colocadas em um período anterior econômico do fruto, e isso se torna um processo essencial para o desenvolvimento tecnológico e institucional (Hoff, 2011).

Isso significa que os arranjos institucionais não podem ser considerados ótimos em termos absolutos, pois são moldados por condicionantes históricos, culturais e políticos próprios de cada país. Enquanto em alguns contextos institucionais houve a promoção de um ambiente favorável à inovação e ao crescimento econômico, em outros, a estrutura institucional limitou essas possibilidades.

Esse conceito se dá pela articulação de conexões na cadeia produtiva da produção e na demanda do mercado, e justifica a manutenção de determinados comportamentos e adoções tecnológicas tradicionais, mesmo diante do surgimento de alternativas mais eficientes. Diante desse panorama tecnológico, o autor David (1985) demonstra esse fenômeno em seu artigo “*Clio and the Economics of QWERTY*”, onde revela que, mesmo existindo outras opções de teclados usados nos computadores, o uso dos teclados convencionais predomina no mercado.

Já no âmbito do desenvolvimento institucional, North (1990) utiliza desse conceito para evidenciar a importância de fatores históricos em medidas providenciadas no presente. Nesse sentido, a matriz institucional do passado influência de maneira direta decisões e escolhas atuais (Shikida e Perosa, 2012).

Um exemplo evidente dessa dinâmica é a indústria automobilística brasileira, que, ao longo dos anos, manteve o motor de combustão interna como padrão, apesar do desenvolvimento de tecnologias alternativas e benéficas para o bem-estar social, como os veículos elétricos, o que se deu devido a fatores institucionais e tecnológicos evidenciados na economia brasileira.

No entanto, para entender melhor como aplicar os conceitos de *path dependence* na realidade brasileira, será abordado separadamente os seus dois cenários (tecnológico e institucional) a seguir.

1.2.1 *Path Dependence* Tecnológica

Na obra de David (1985), é apresentado o *Dvorak Simplified Keyboard* (DSK), um layout de teclado desenvolvido para proporcionar maior conforto e eficiência na digitação. Patenteado em 1932 por August Dvorak e W. L. Dealey, o DSK é adotado por diversos usuários, muitos dos quais detêm recordes mundiais de digitação rápida. Além disso, experimentos conduzidos pela Marinha dos EUA na década de 1940 comprovaram que a maior eficiência proporcionada pelo DSK poderia compensar os custos de retreinamento de um grupo de digitadores em apenas dez dias de trabalho em tempo integral (David, 1985).

Contudo, o QWERTY, criado por Christopher Latham Sholes, apesar de suas limitações e com uma baixa eficiência em comparação ao DSK, permaneceu como padrão global devido a uma série de decisões interdependentes que favoreceram sua continuidade, mostrando como fatores históricos e econômicos podem definir o rumo das inovações tecnológicas, muitas vezes de maneira irreversível.

Para justificar isso, David (1985) explica que tudo começa no final do século XIX, quando os custos de conversão de *software* (habilidades dos digitadores) aumentavam, enquanto os custos de conversão de *hardware* (máquinas de escrever) diminuíam. Como resultado, fabricantes de máquinas de escrever encontraram vantagens em adaptar seus produtos ao padrão criado por Sholes, já estabelecido, em vez de promover mudanças que exigiriam o retreinamento de usuários.

“No entanto, embora sejam, como se diz atualmente, perfeitamente “livres para escolher”, seu comportamento ainda está firmemente preso ao impacto de eventos há muito esquecidos e moldado por circunstâncias nas quais nem eles nem seus interesses tiveram influência.” (David, 1985, p. 333; Tradução Própria)

Assim, mesmo com o surgimento de novas tecnologias de teclado, como a DSK – que não estavam tecnicamente presas ao QWERTY –, as empresas optaram por manter esse layout devido à grande base de digitadores treinados nesse padrão, o que criou uma assimetria no custo de conversão: mudar os teclados era barato, mas mudar as habilidades dos digitadores era caro. Dessa forma, fabricantes que utilizavam layouts alternativos foram forçados a adotar o QWERTY para garantir compatibilidade com a mão de obra existente, consolidando ainda mais seu domínio e tornando sua substituição cada vez mais improvável.

Nesse contexto, Hoff (2011) afirma que a difusão de uma tecnologia não é instantânea, mas sim um processo sequencial e cumulativo. Portanto, à medida que uma tecnologia é adotada, ela gera retornos crescentes ao longo do tempo, impulsionados tanto pelo progresso técnico acumulado quanto por efeitos de rede que beneficiam novos adotantes.

Além disso, a adoção traz benefícios tanto incondicionais (independentes do número de usuários) quanto condicionais (aumentados pelo crescimento da base de usuários). Dessa forma, como o uso contínuo de uma tecnologia fortalece as condições complementares ao seu funcionamento, cria-se um efeito de *lock-in*, no qual uma única tecnologia se torna dominante no mercado, dificultando a adoção de alternativas, mesmo que potencialmente superiores, como é o caso do teclado QWERTY.

1.2.2 *Path Dependence* Institucional

O conceito de *path dependence*, embora frequentemente associado às mudanças tecnológicas, passou, nas últimas décadas, a ser amplamente discutido nas Ciências Sociais, especialmente no estudo das sociedades e das dinâmicas políticas (Hoff, 2011). Esse conceito se entrelaça diretamente com o cenário institucional, pois as trajetórias são moldadas por acordos e combinados políticos, que, ao serem estabelecidos, condicionam as possibilidades futuras de ação.

Nesse contexto, as instituições, moldadas por contextos socioeconômicos, consolidam-se com o tempo e passam a influenciar o desenvolvimento por meio de dinâmicas que se retroalimentam. Dessa forma, segundo Cesaris (2009), suas regras iniciais geram efeitos duradouros, criando uma inércia institucional que restringe mudanças, mesmo diante de alternativas mais eficientes.

Outra característica presente na lógica do *path dependence* implica que mudanças institucionais ocorrem de forma gradual, salvo em momentos críticos de ruptura. Essa perspectiva ajuda a entender a persistência de certas estruturas, mesmo diante de novas demandas (Cesaris, 2009).

Nesse cenário, Mahoney (2000) aponta que, as sequências autorreforçadoras fazem com que as instituições, uma vez estabelecidas, se beneficiem de processos de reprodução estrutural, onde mudanças tornam-se cada vez mais custosas e improváveis.

"Com sequências autorreforçadoras, a inércia envolve mecanismos que reproduzem um padrão institucional ao longo do tempo. [...] Uma vez que um processo é iniciado e começa a seguir um determinado resultado, ele tende a continuar nessa trajetória." (Mahoney, 2000, p. 511; Tradução própria)

Dessa forma, agentes poderosos que se beneficiam dessas instituições frequentemente atuam para preservar sua estrutura, dificultando tentativas de reforma. Assim, mesmo quando novas alternativas mais eficientes ou justas surgem, o custo e a resistência à mudança fazem com que as instituições permaneçam em trajetórias já consolidadas, demonstrando a lógica da dependência da trajetória no desenvolvimento institucional (Mahoney, 2000).

Nesse processo, o Estado, conforme proposto por Mazzucato (2014) no tópico anterior, atua como agente central ao direcionar trajetórias institucionais por meio de

investimento e coordenação, impulsionando setores estratégicos sem romper com a lógica da dependência de trajetória (Mazzucato, 2014).

Em síntese, a análise do conceito de *path dependence* no âmbito institucional e tecnológico evidencia como decisões passadas moldam e restringem as possibilidades futuras, perpetuando estruturas e práticas ao longo do tempo.

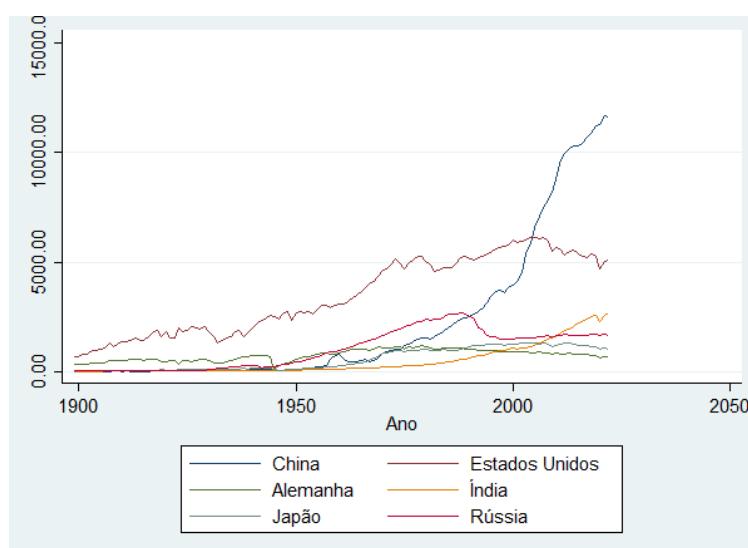
1.3 Institucionalização do Desenvolvimento Sustentável e Eco-inovação

A partir da segunda metade do século XX, as evidências científicas sobre os impactos ambientais intensificaram a preocupação global com a sustentabilidade. Embora o progresso tecnológico tenha avançado e promovido o bem-estar, seus efeitos foram profundamente nocivos ao meio ambiente (Nobre e Amazonas, 2002).

Nesse contexto, a industrialização em larga escala foi identificada como um dos principais vetores de emissão de gases poluentes, contribuindo diretamente para o agravamento das mudanças climáticas. A ausência de uma perspectiva ambiental no desenvolvimento tecnológico desse período é, portanto, um fator chave para o acúmulo dos problemas climáticos atuais (Nobre e Amazonas, 2002).

O histórico de emissões de GEE (gases de efeito estufa) dos principais países industriais entre 1900 e 2022, apresentado no gráfico 1, revela um aumento significativo a partir da década de 1950, período de intensa industrialização.

Gráfico 1: Histórico de emissões de gases poluentes entre 1900 e 2022 (em MtCO₂e)



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do *Climate Watch* (2022)

Dessa forma, as destruições causadas por indústrias passaram a ser vistas como algo a se combater de maneira efetiva, visto que, por muitos anos elas foram “mascaradas” pelas correntes dominantes – como a economia neoclássica – envolvendo a produção em massa (Nobre e Amazonas, 2002).

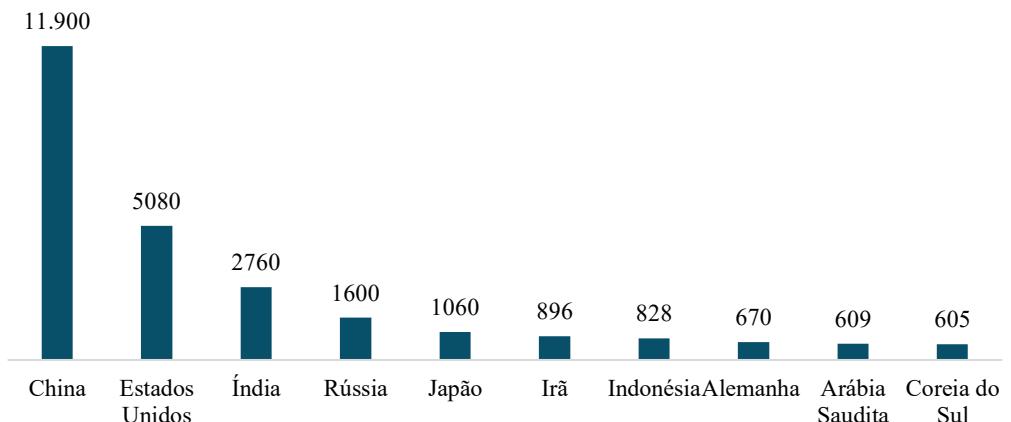
Nesse sentido, em 1992 a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD) introduz ao mundo o termo “desenvolvimento sustentável”, que se refere à capacidade de atender às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de que as futuras gerações também possam suprir as suas (Barbieri, 2010).

A introdução do conceito, nesse contexto, marcou um ponto de inflexão na agenda internacional, promovendo um maior alinhamento entre as nações para a busca por soluções conjuntas frente aos desafios ambientais.

Contudo, somente no século XXI observa-se uma mudança mais concreta na postura das nações diante da questão ambiental, com a formalização de acordos internacionais voltados à redução de emissão desses gases, como o Protocolo de Kyoto (2005), que impôs metas obrigatórias de redução de emissões aos países desenvolvidos e introduziu mecanismos inovadores, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que incentivava investimentos em tecnologias limpas em nações em desenvolvimento, e o Acordo de Paris (2015), que propôs medidas de redução de GEE a partir de 2020, de modo a garantir que o aumento da temperatura não ultrapassasse 2 graus em relação aos níveis pré-industriais.

Ademais, um marco importante nesse processo foi o pacto firmado em 2014 entre os Estados Unidos e a China — países que mais emitem gases poluentes, como evidenciado nos gráficos 1 e 2.

Gráfico 2: Emissões de CO₂ por País, 2022 (em MtCO₂e)



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do *Climate Watch* (2022)

Esses acordos bilaterais e projetos internacionais são caracterizados como uma institucionalização do conceito de desenvolvimento sustentável, o que torna a preocupação com a degradação ambiental mais alinhada às decisões políticas, e faz mais crescente a conscientização sobre a necessidade de políticas climáticas efetivas no combate ao aquecimento global. Segundo Nobre e Amazonas (2002), desde a década de 1970, a institucionalização da problemática ambiental se torna mais presente, e passa a se tornar a questão ambiental central em um plano de agenda política internacional, impulsionando mais ainda a penetração dos resultados positivos possíveis das políticas públicas ambientais.

A partir desse novo paradigma, surge o conceito de “descarbonização”, difundido por diversos estudiosos como uma resposta estratégica à insuficiência das inovações tecnológicas isoladas para resolver a crise ambiental. Essa descarbonização propõe a redução progressiva das emissões de carbono por meio de ações integradas que envolvem ciência, tecnologia e inovação, promovendo o engajamento ativo da sociedade (Oliveira et al. 2020).

Essa abordagem estimula a identificação coletiva de problemas, a formulação de boas práticas e a transformação de comportamentos alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) (Oliveira et al. 2020).

Assim, com a introdução de uma inovação orientada pela sustentabilidade, e mediante às pressões institucionais que focam em práticas industriais sustentáveis, o modelo de organização inovadora sustentável se torna uma tendência empresarial, visto

que o fator sustentável se tornou um componente de competitividade e diferenciação das empresas e países dentro do mercado mundial (Barbieri, 2010).

“Só recentemente a adesão das empresas passou a ser induzida por fatores de natureza empresarial ou, dito de outra forma, fazer parte desse movimento passou a ser um fator de competitividade, seja como fonte de diferenciação, seja como fonte de qualificação para continuar no mercado.” (Barbieri, 2010, p. 2).

Diante disso, o conceito de “eco-inovação” emerge como desdobramento do desenvolvimento sustentável, orientando políticas, estratégias e práticas que conciliam crescimento econômico, responsabilidade ambiental e justiça social. Essa abordagem é essencial para organizações que buscam competitividade com menor impacto ecológico (Barbieri, 2010).

A eco-inovação, portanto, pode ser compreendida como a introdução ou a adoção de produtos, processos, serviços ou métodos de gestão que, embora novos para determinada organização, proporcionem ao longo de seu ciclo de vida uma redução significativa de riscos ambientais, poluição e outros impactos negativos associados ao uso de recursos naturais, quando comparados às alternativas convencionais (Kemp e Pearson, 2007, p. 7). Trata-se, portanto, de uma ferramenta estratégica capaz de aliar inovação tecnológica à preservação do meio ambiente.

A adoção de práticas eco-inovadoras deve gerar benefícios ambientais concretos, como a diminuição no consumo de água, energia e matérias-primas, promovendo maior eficiência ecológica. Paralelamente, tais inovações também resultam em ganhos econômicos relevantes, seja por meio da redução de custos operacionais, do aumento da rentabilidade ou da valorização da imagem institucional perante consumidores e investidores conscientes (Barbieri, 2010).

“Como o sistema operacional produtivo e as inovações de produto e de processo, ao atender as três dimensões da sustentabilidade, devem gerar ganhos para o meio ambiente em termos de redução no uso de recursos e de emissões de poluentes, o aumento da produção pelo incitamento à demanda por novos produtos pode neutralizar ou até superar esses ganhos.” (Barbieri, 2010, p. 8)

Assim, da mesma forma que o avanço tecnológico impactou negativamente no cenário ambiental, com emissão de gases poluentes e destruições florestais para

construção de indústrias, entre outros, ela pode ser uma grande aliada do que se denomina eco-inovação – tecnologias sustentáveis/renováveis.

No entanto, a conciliação entre inovação e preservação ambiental requer planejamento, análise crítica e o reconhecimento de que a sustentabilidade deve ser um critério central, e não apenas acessório, nos processos de inovação. De acordo com Kemp. & Pearson (2007), mesmo inovações que promovem ganhos ambientais podem gerar impactos adversos — por isso é essencial avaliar seus efeitos colaterais e compará-las com alternativas relevantes ao longo do ciclo de vida.

Dessa forma, no âmbito das eco-inovações, evidencia-se a centralidade das instituições estatais na indução de transformações ambientais tecnológicas, sobretudo diante das assimetrias globais, dos interesses políticos divergentes e das agendas setoriais em disputa. Além disso, considerando os elevados níveis de incerteza e risco que caracterizam os estágios iniciais da inovação, é imperativo que o Estado atue de forma estratégica e proativa, assumindo o papel de agente empreendedor, conforme argumenta Mazzucato (2014).

Nesse sentido, políticas públicas e tratados internacionais configuram instrumentos cruciais para direcionar e alinhar o desenvolvimento tecnológico à sustentabilidade, ao estabelecerem marcos regulatórios e incentivos capazes de fomentar práticas responsáveis. À luz desse cenário, torna-se imprescindível compreender as dinâmicas institucionais e sociotécnicas que estruturaram a inovação no setor automotivo, a fim de avaliar, de maneira crítica, os condicionantes e possibilidades da eletrificação veicular no Brasil.

CAPÍTULO 2: PARTICULARIDADES DA MATRIZ BIOENERGÉTICA BRASILEIRA

Este capítulo analisa como as particularidades da matriz bioenergética brasileira, em articulação com a evolução das instituições públicas e privadas, condicionaram a consolidação dos biocombustíveis como um vetor estratégico para a transição energética nacional e contribuíram para a produção de outras alternativas oriundas da biomassa.

2.1 Setor sucroenergético

O setor sucroenergético, anteriormente denominado setor sucroalcooleiro, compreende o segmento da agroindústria voltado à produção de açúcar, bioenergia e, principalmente, o etanol, a partir da cana-de-açúcar. A substituição do termo reflete a ampliação das fronteiras tecnológicas e produtivas do setor, sobretudo com o avanço de soluções energéticas sustentáveis baseadas na biomassa (Campos, 2014).

Entre essas inovações, destaca-se a utilização do bagaço da cana-de-açúcar como fonte para geração de eletricidade, o que contribui para diversificar a matriz energética brasileira e reduzir sua dependência de fontes fósseis. Essa ampliação do uso da cana reforça o papel estratégico do setor na transição energética nacional (Campos, 2014).

De maneira geral, do ponto de vista histórico, as atividades sucroenergéticas passaram por um processo de modernização e expansão, alicerçado tanto em estímulos internos quanto em dinâmicas externas. O processo de integração entre agricultura e indústria, impulsionado por políticas alinhadas à Revolução Verde foi um dos principais fatores de avanço do setor sucroenergético brasileiro (Delgado, 2012; Pereira, 2022).

Nesse cenário, um marco político fundamental foi a criação do Instituto do Açúcar e do Álcool (IAA) em 1933, que instituiu uma regulação estatal abrangente por meio de cotas de produção e controle da cadeia produtiva. Seu objetivo central foi fomentar a produção nacional e garantir estabilidade econômica ao setor diante das oscilações do mercado internacional (Távora, 2011).

Na década de 1980, a desvalorização cambial e a adoção de políticas agrícolas eficientes — como preços mínimos, crédito de custeio e flexibilização das exportações — fortaleceram a produção nacional, modernizando o setor e resultando em expressivo crescimento das lavouras voltadas à exportação, especialmente a da cana-de-açúcar, conforme apresentado na tabela 1 (Mello, 1990).

Tabela 1: Taxas de crescimento da Produção Agrícola Brasileira, 1980/89 (em % ao ano)

	Produção	Área	Produtividade
Lavouras-Total	3,56	1,49	2,07
Lavouras-Domésticas	2,05	zero (0,67)	1,39
Lavouras-Exportação	4,51	2,36	2,16
Produtos Animais	3,43		

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Mello (1990)

Outras políticas que se destacaram nesse processo foram o Sistema Nacional de Crédito Rural (SNCR) e os órgãos reguladores, como a Comissão de Financiamento da Produção (CFP), que, assim como propõe Schumpeter (1982), possuem um papel importante do crédito para o financiamento das inovações — e da indústria como um todo. Sob influência das elites políticas, essas instituições passaram a direcionar políticas subsetoriais e regionais à produção e comercialização do etanol, o que, consequentemente, elevou a produção da cana (Delgado, 2012).

Mais recentemente, o chamado “Boom das Commodities” — marcado pelo aumento da demanda e dos preços de produtos primários no início do século XXI — impulsionou as exportações agrícolas, elevando o valor do açúcar e fortalecendo o papel estratégico do etanol como fonte renovável valorizada globalmente por seu potencial de substituir combustíveis fósseis e contribuir para a descarbonização (Pereira, 2022).

Esse novo cenário insere-se no que Svampa (2013) denomina como “Consenso das Commodities”, no qual o agronegócio assume papel central na política econômica. No Brasil, esse modelo se traduz em um pacto político-econômico que prioriza as exportações de commodities como estratégia de superávit comercial e fortalecimento das cadeias agroindustriais (Delgado, 2012; Pereira, 2022).

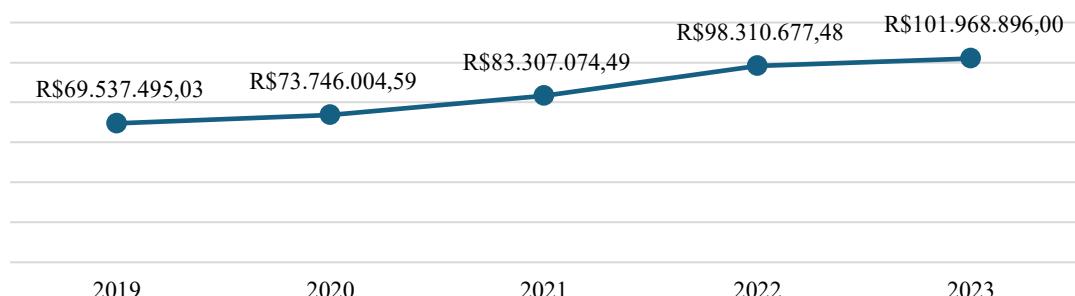
Nesse âmbito, desde 2002, o setor sucroenergético brasileiro tem se expandido, sobretudo no Cerrado, com novos cultivos e usinas. A rigidez locacional da cana favorece a concentração fundiária e a implantação de plantas *flex-fuel* próximas às lavouras, o que restringe a diversificação das atividades econômicas locais e aumenta a eficiência produtiva (Castillo, 2015).

Além do aumento da demanda nacional e mundial por etanol, com a valorização mundial do etanol como “biocombustível”, o desenvolvimento da tecnologia de

veículos *flexfuel* no mercado interno também representou um marco para a expansão da produção desse insumo primário (Pereira, 2022).

Consequentemente, a cadeia canavieira consolidou-se como um dos principais complexos agroindustriais do país, caracterizando-se por sua elevada eficiência produtiva e pela capacidade de gerar diversos subprodutos. Essa diversificação ampliou o valor agregado do setor, reforçando seu papel estratégico no avanço da bioeconomia, e tornou o Brasil o principal produtor de cana-de-açúcar, segundo dados da Yara Brasil (2023) (Moraes e Bacchi, 2014).

Gráfico 3: Trajetória do Valor da Produção da Cana-de-Açúcar no Brasil*



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do IBGE (2024)

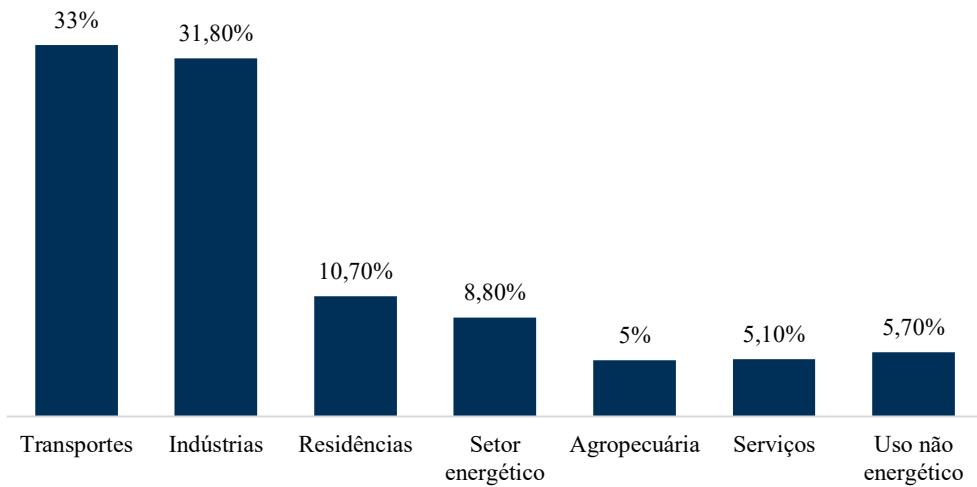
*valores deflacionados para o ano base de 2023

Dessa forma, essa consolidação histórica do setor sucroenergético foi crucial para o protagonismo do Brasil na produção de biocombustíveis. No próximo tópico, será aprofundado a análise da expansão desses combustíveis e a posição estratégica do país em termos de oferta e demanda global.

2.2 Biocombustíveis

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis impulsionou o protagonismo dos biocombustíveis, uma vez que eles têm um menor impacto nas emissões de gases de efeito estufa, já que são derivados de materiais biológicos como resíduos agrícolas, óleos vegetais e culturas energéticas (Branco, 2013). Nesse sentido, eles se tornam uma solução promissora, tendo em vista que o setor de transporte é o que mais consome energia, como demonstrado no gráfico 4.

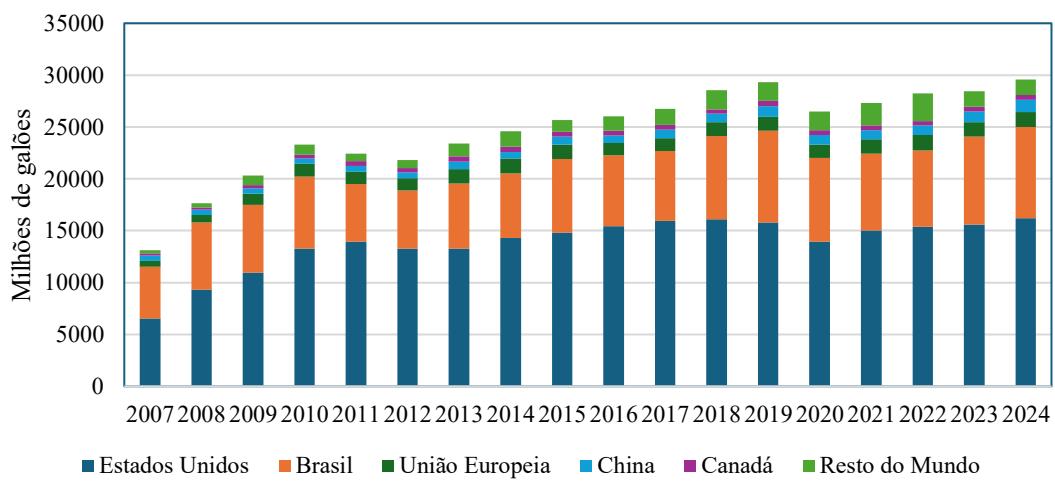
Gráfico 4: Distribuição percentual do consumo total de energia por setor, com base em Mtep, em 2023



Fonte: Elaboração própria a partir de dados da EPE (2024)

Nesse cenário, o Brasil é um dos líderes mundiais na produção de biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel, conforme apresentado nos gráficos 5 e 6, e sua indústria automotiva, ainda que dominada por empresas multinacionais, tem a tendência de valorizar o uso de biocombustíveis (Hamatsu e Souza, 2024).

Gráfico 5: Trajetória da Produção Global de Etanol por região entre 2007 e 2024



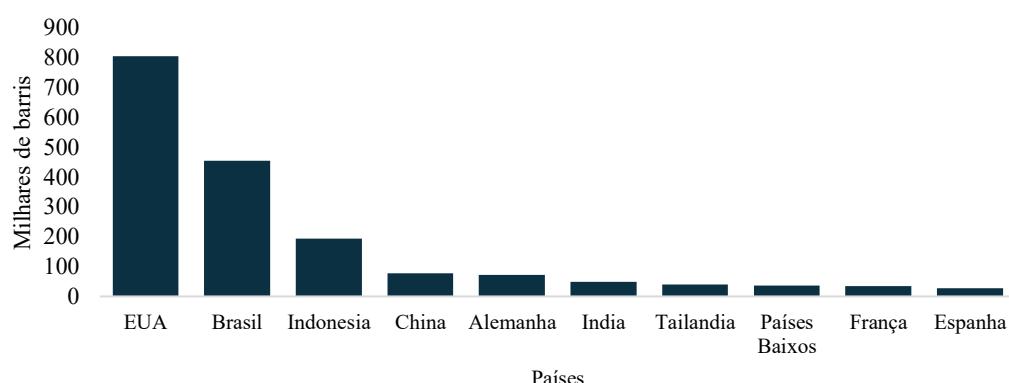
Fonte: Elaboração própria a partir de dados da *Renewable Fuels Association* (2024)

Nesse âmbito, em 2010, a Agência de Proteção Ambiental dos EUA reconheceu o etanol de cana-de-açúcar como um biocombustível avançado, capaz de reduzir em até

61% as emissões de gases do efeito estufa em comparação com a gasolina (UNICA, 2010). Ademais, por possuir uma atuação ampla na cadeia de produção de biocombustíveis, a centralidade estratégica do Brasil nesse setor se torna ainda mais notável.

Assim, o desenvolvimento de um mercado interno robusto e uma infraestrutura consolidada de distribuição tornaram o Brasil referência global na utilização de fontes renováveis no setor de transportes, sendo considerado um dos grandes drivers de energia limpa entre as nações em desenvolvimento. Como pode-se observar no gráfico a seguir, o Brasil possui destaque mundial em relação à produção dos biocombustíveis, principalmente pelo Etanol.

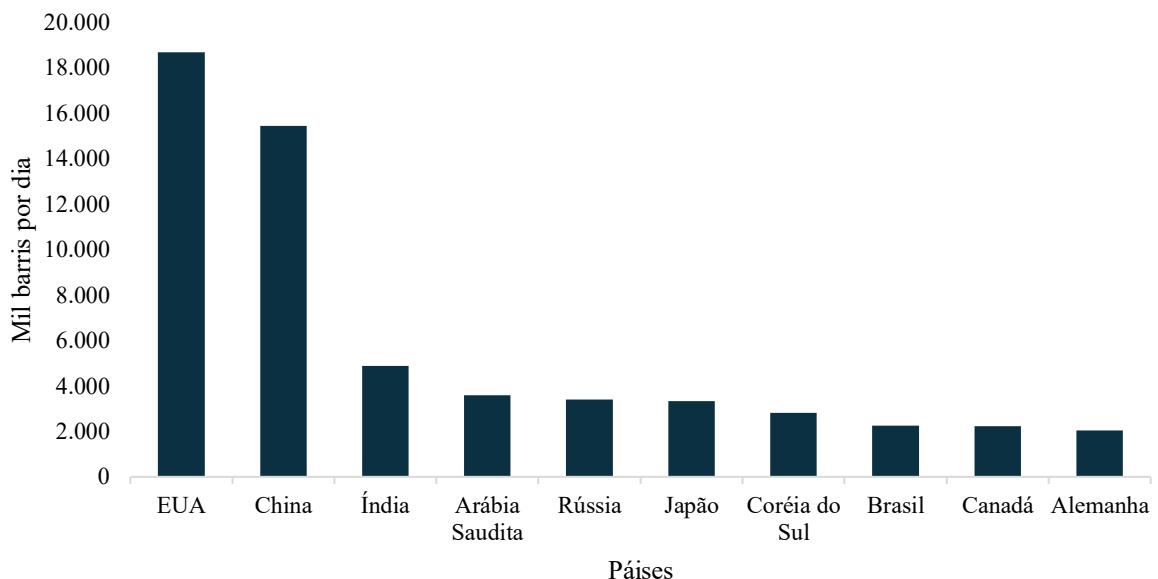
Gráfico 6: *Ranking* mundial dos principais países produtores de biocombustíveis em 2023



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Statista

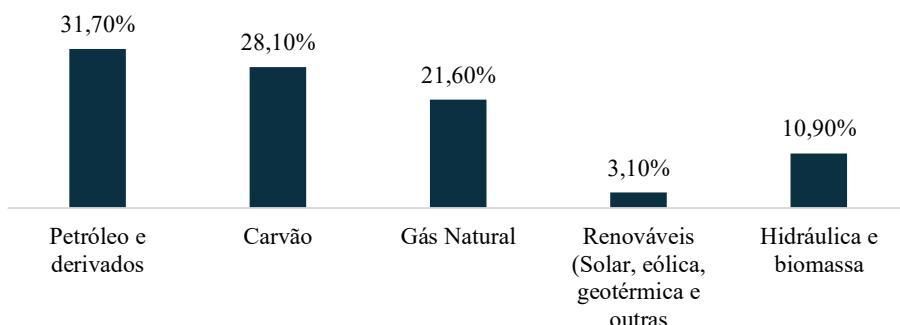
Esses dados se tornam ainda mais relevantes quando se observa a matriz energética das outras nações, presente nos gráficos 7 e 8. Países como China e Estados Unidos lideram consumo de petróleo e derivados.

Gráfico 7: Maiores consumidores de petróleo e líquidos de gás natural em 2021 (mil barris por dia)



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do IBP (2021)

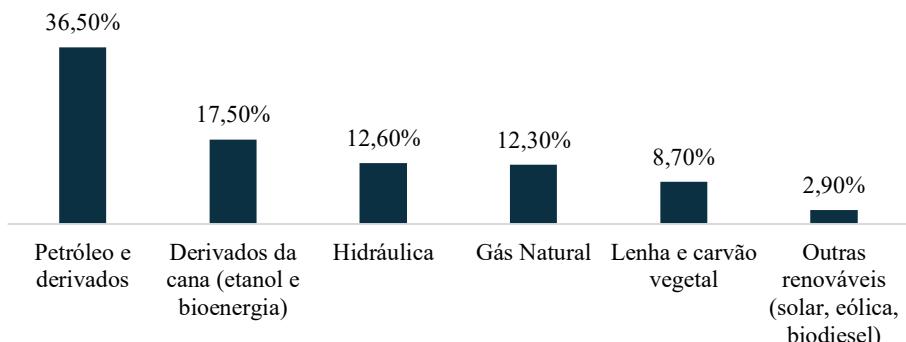
Gráfico 8: Matriz energética mundial em 2022 (em %)



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do IEA

Quando se compara a matriz energética mundial com a nacional (no gráfico 9), percebe-se a posição satisfatória que o Brasil estabelece em relação às energias renováveis devido ao maior uso de energias renováveis como derivadas da cana-de-açúcar e hidráulica.

Gráfico 9: Matriz energética brasileira em 2023 (em %)



Fonte: Elaboração Própria a partir de dados da EPE (2024)

Assim, percebe-se o relevante protagonismo do setor sucroenergético brasileiro – principal responsável pela produção do etanol –, apresentado no tópico anterior. É imprescindível reconhecer a sua importância para a consolidação dos biocombustíveis, a qual resultou da articulação entre sistemas técnicos e estruturas institucionais preexistentes, evidenciando a influência de redes de interesse na definição de trajetórias tecnológicas, como apontam Andrade (2006) e Callon (1987).

Dessa forma, comprehende-se que esse avanço industrial e a posição internacional do setor resultaram do esforço empresarial e da expansão agrícola. No entanto, essa vantagem competitiva significativa brasileira também se deu pela experiência de décadas com políticas públicas voltadas para a substituição de combustíveis fósseis.

Nesse cenário, após entendermos a posição internacional brasileira em relação à sua produção e de que forma a expansão agrícola pavimentou o terreno para a sustentação e crescimento dos biocombustíveis, a seguir, com a apresentação da história dos biocombustíveis e algumas das principais políticas do setor, será analisado de maneira mais profunda como essas políticas impulsionaram o sucesso dos biocombustíveis no Brasil.

2.2.1 História dos Biocombustíveis

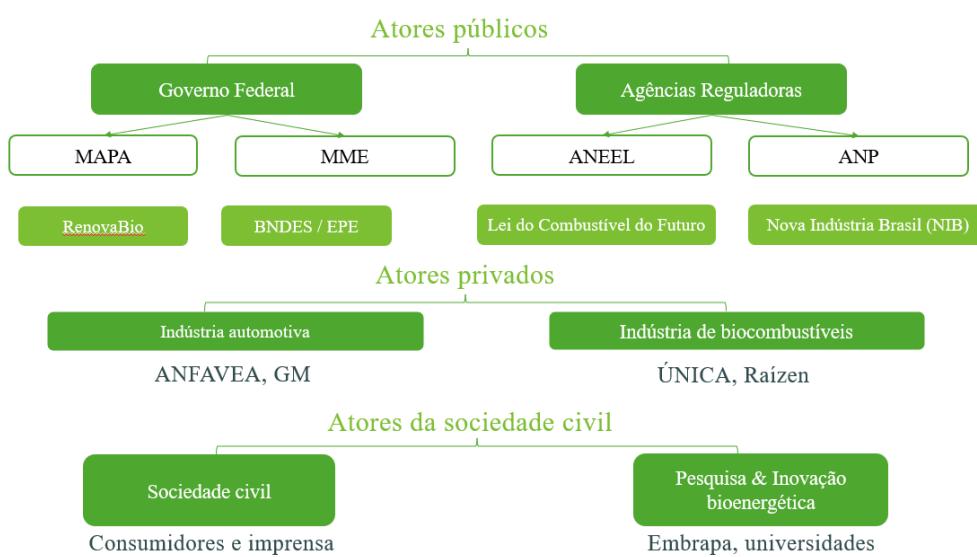
A priorização da indústria petrolífera no Brasil resultou em uma alta dependência do petróleo importado, o que tornou o país vulnerável às crises do mercado internacional na década de 1970. Como resposta estratégica, os biocombustíveis, especialmente o etanol, surgiram como uma alternativa para diversificar a matriz energética e mitigar os impactos econômicos da volatilidade dos preços (Távora, 2011).

Nesse contexto, a entrada do álcool combustível na matriz energética brasileira foi impulsionada pela "orquestração" de interesses entre diversos atores públicos e privados, atuando na manutenção e desenvolvimento dessa rota energética. Conforme Shikida (1997) e Shikida e Perosa (2012), a crise do petróleo e a crise da agroindústria canavieira favoreceram essa aliança, que englobou usinas e destilarias – instalações industriais onde o álcool etílico é produzido a partir da cana-de-açúcar –, o Estado, o setor de máquinas e equipamentos, e a indústria automobilística.

Os interesses do Estado incluíam a economia de divisas, a redução das desigualdades regionais de renda, o crescimento da renda interna e a geração de empregos. Para a indústria automobilística, o carro a álcool se apresentava como uma alternativa viável para a política de transporte rodoviário. Já os empresários do setor sucroalcooleiro buscavam diversificar a produção e encontrar um novo mercado frente às crises do açúcar.

Essa rede de atores, que inclui o Governo Federal (MAPA, MME), agências reguladoras (ANEEL, ANP), a indústria automotiva (ANFAVEA, GM) e de biocombustíveis (ÚNICA, Raízen), bem como a sociedade civil (consumidores, imprensa) e centros de pesquisa (Embrapa, universidades), foi, e continua sendo, fundamental para o avanço dos biocombustíveis. A figura 1, a seguir, apresenta esse complexo alinhamento e articulação entre esses principais atores envolvidos com a produção e regulamentação dos biocombustíveis.

Figura 1: Quadro ilustrativo da rede de atores presente na indústria energética automotiva.

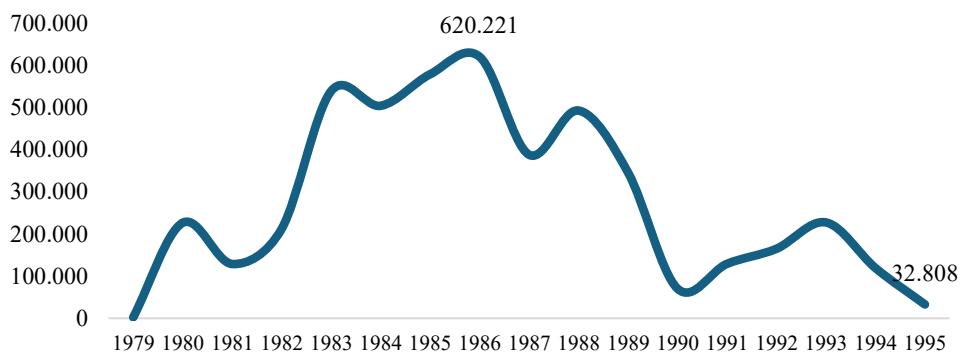


Fonte: Elaboração Própria

Dentro desse contexto de orquestração de interesses, um importante marco histórico para os biocombustíveis foi a criação, em 1975, do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que tinha como objetivo mitigar os desequilíbrios do balanço de pagamentos e fortalecer a autonomia energética nacional. A diversificação da frota veicular contribuiu para a redução da dependência externa e impulsionou o crescimento do setor sucroenergético entre 1975 e 1985 (Távora, 2011).

Contudo, após 1986 houve uma queda no consumo do etanol pela população devido à problemas internos nos veículos movidos a álcool e à queda do preço do petróleo, principalmente (Moraes e Bacchi, 2014).

Gráfico 10: Número de licenciamentos de autoveículos novos à etanol entre 1979 e 1995

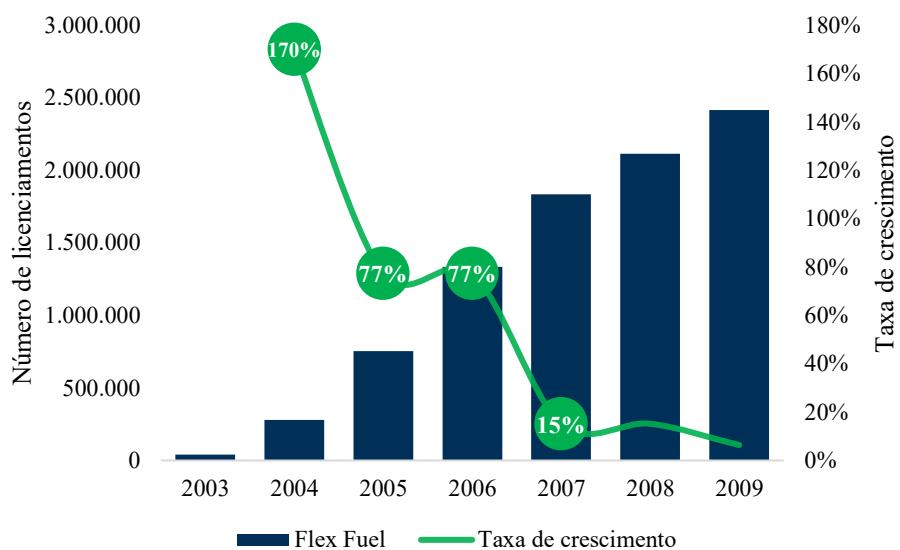


Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Anuário Anfavea 2024

É somente em 2003, com o surgimento dos carros *flex fuel* – em que os veículos finalmente podem ser movidos a álcool, ou à gasolina a qualquer taxa de mistura –, que o consumo de etanol se expande de maneira significativa (Conab, 2008).

A partir desse ponto de origem houve um forte aumento na compra desses veículos nos anos posteriores, como é perceptível no gráfico 11, o que consequentemente revela a ampliação da produção e consumo do biocombustível. Além disso, a participação dos veículos *flex fuel* na frota total brasileira manteve uma taxa constante de aproximadamente 90% entre 2008 e 2022, evidenciando a relevância e a consolidação dessa tecnologia no país.

Gráfico 11: Número de licenciamentos de autoveículos novos flex fuel x taxa de crescimento entre 2003-2009



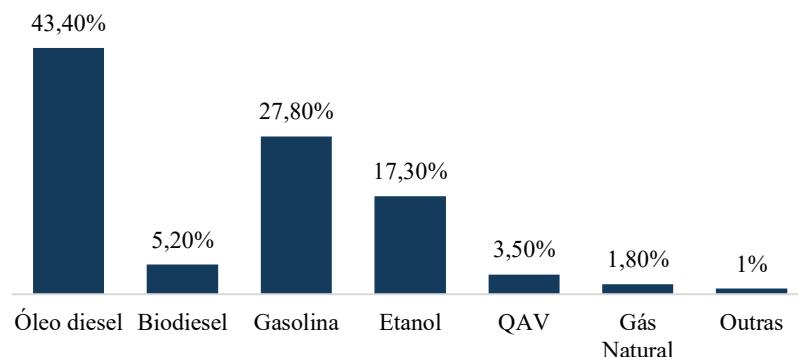
Fonte: Elaboração própria com base nos dados da Anfavea Anuário 2024

Esse avanço tecnológico – criação e difusão da tecnologia *flex fuel* – garantiu aos consumidores brasileiros, a partir de critérios econômicos, sociais e ambientais, maior flexibilidade e autonomia quando abastecem os carros (Reis e Silva, 2017).

Assim, o Brasil, além de possuir uma capacidade para ampliar a produção de etanol, já que possui um setor sucroenergético consolidado e disponível, a maioria da sua frota circulante já é equipada com a tecnologia *flex fuel*, o que garante uma grande vantagem em relação, por exemplo, aos Estados Unidos, que embora sejam grandes produtores de etanol, não possuem predominantemente essa tecnologia na frota já em circulação (Rovai, 2024).

Outrossim, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), instituído em 2005 junto à Lei nº 11.097/05, impulsionou a expansão da produção de biodiesel no Brasil (MME, 2006). Diante do expressivo consumo de óleo diesel pelo setor de transportes — responsável por cerca de 43,44% da demanda energética nacional —, observa-se um elevado potencial de crescimento desse biocombustível, que substitui o diesel fóssil em motores do ciclo diesel, por meio da ignição iniciada pelo aumento da temperatura e compressão da massa de ar (Milanez et al., 2022; EPE, 2024).

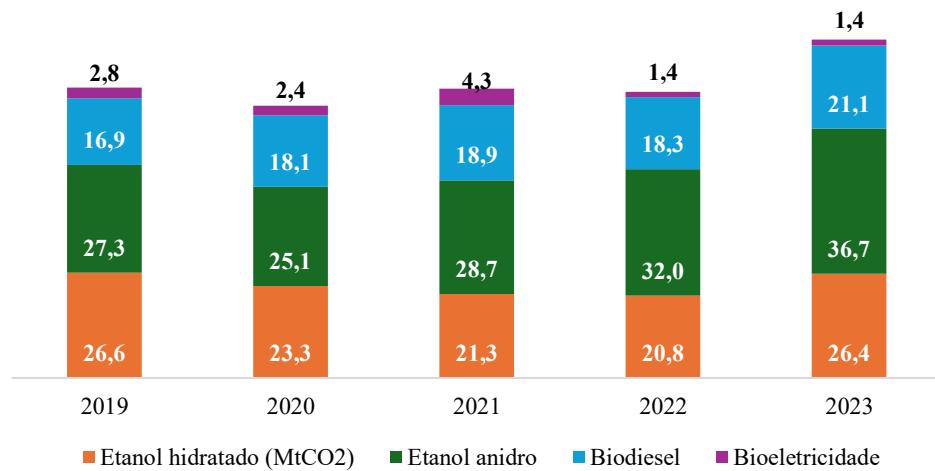
Gráfico 12: Participação das fontes energéticas no setor de transportes em 2023



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do EPE

Como resultado dos esforços institucionais voltados à promoção dos biocombustíveis, do setor sucroenergético e da produção de outras biomassas, o Brasil obteve uma significativa redução nas emissões de gases de efeito estufa. A atuação coordenada por meio de políticas públicas e instrumentos regulatórios voltados à bioenergia contribuiu para esse desempenho. O gráfico 13 a seguir apresenta as emissões evitadas entre os anos de 2019 e 2023.

Gráfico 13: Emissões Evitadas com Bioenergia entre 2019 e 2023 (em MtCO₂)



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do EPE

Nesse contexto, observa-se nitidamente o fenômeno de *path dependence*, apresentado por North (1990) e David (1985), em que decisões políticas e tecnológicas do passado — como a criação do Proálcool e os incentivos à produção de cana-de-

açúcar — estruturaram uma rede de interesses e atores consolidada que tem força para resistir a mudanças disruptivas, como a eletrificação veicular.

Outrossim, assim como o Proálcool e o PNPB, outros programas favoreceram o setor de biocombustíveis no Brasil. Conforme apresentado a seguir, serão analisados de maneira breve algumas das principais políticas que atuam no atual cenário político econômico brasileiro.

2.2.2 Proconve

Instituído em 1986 e coordenado pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama), o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) estabelece limites progressivos para as emissões de poluentes por veículos leves, pesados, máquinas agrícolas e de construção no Brasil. O programa foi responsável por reduções superiores a 98% nas emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NOx), contribuindo significativamente para a mitigação dos impactos ambientais do setor de transportes (Ibama, 2022).

Além disso, promoveu a modernização tecnológica da indústria automotiva nacional e o aprimoramento da qualidade dos combustíveis. As fases mais recentes — L-7/P-8 — entraram em vigor em janeiro de 2022 e 2023, respectivamente, alinhando o Brasil aos padrões Euro 6 — conjunto de regulamentações europeias que estabelecem limites máximos para as emissões de poluentes por veículos, com o objetivo de reduzir a poluição do ar (Ibama, 2022).

2.2.3 RenovaBio

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), instituída pela Lei nº 13.576/2017, é a principal iniciativa brasileira voltada à redução do uso de combustíveis fósseis no setor automotivo. Seu objetivo é promover a expansão sustentável dos biocombustíveis, alinhando eficiência energética, redução das emissões de gases de efeito estufa e competitividade, em conformidade com o Acordo de Paris.

A execução e o monitoramento da política são conduzidos principalmente pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), responsável pelo planejamento energético, e pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). Já a Agência Nacional do Petróleo (ANP) define metas individuais de descarbonização para os

distribuidores com base em sua participação no mercado, integrando a meta nacional decenal de redução da intensidade de carbono, vigente de 2023 a 2033.

Os principais instrumentos do RenovaBio são: Certificação da Produção de Biocombustíveis – que avalia se o produtor de biocombustíveis cumpre critérios de elegibilidade e mede sua eficiência ambiental em comparação ao combustível fóssil – e Crédito de Descarbonização (CBIO) – ativo ambiental negociável no mercado financeiro, emitido por produtores de biocombustíveis, usado por distribuidoras para cumprir metas anuais de redução de emissões, o que possibilita aos produtores mais recursos para investimentos que possibilitarão a expansão dos biocombustíveis.

O programa, além de promover maior alcance de novas tecnologias, como Biogás, Etanol de Segunda Geração, e novas variedades oriundas de bagaço da cana, também garante redução de custos de produção aos produtores de biocombustíveis e redução das importações ao setor. Assim, o programa RenovaBio impulsiona diretamente investimentos em tecnologia e inovação no cenário da produção de biocombustíveis, especialmente ao propor um novo mercado comercial (BNDES, 2023).

2.2.4 Lei do Combustível do Futuro

A Lei nº 14.993, conhecida como "Lei do Combustível do Futuro" e sancionada em 8 de outubro de 2024, constitui uma medida estratégica do governo brasileiro voltada à promoção do desenvolvimento tecnológico e da consolidação da indústria nacional de biocombustíveis e tecnologias de captura e armazenamento de carbono (EPE, 2025).

A norma estabelece diretrizes para a ampliação do uso de combustíveis de baixo carbono — como o Diesel Verde, o Biometano e os Combustíveis Sustentáveis de Aviação (*Sustainable Aviation Fuel*, ou simplesmente, SAF) —, bem como para a atualização dos percentuais obrigatórios de mistura de etanol na gasolina e de biodiesel no diesel. A legislação prevê, ainda, a criação e integração de programas regulatórios com metas quantitativas progressivas até 2025 e 2030, visando garantir maior previsibilidade, segurança jurídica e alinhamento às políticas públicas de transição energética e descarbonização da matriz de transportes (EPE, 2025).

Assim, percebe-se que a atuação do Estado, historicamente ativa por meio de incentivos, programas e regulações, materializa o papel do “Estado empreendedor”

descrito por Mazzucato (2014), ao assumir riscos e impulsionar setores estratégicos nos quais o setor privado se mostra avesso à incerteza.

2.2.5 Nova Indústria Brasil (NIB)

Por fim, a Nova Indústria Brasil (NIB), plano de política industrial vigente no país, ao considerar a liderança brasileira na produção de alternativas sustentáveis, prioriza a bioenergia, os biocombustíveis e a exploração sustentável dos biomas brasileiros na sua Missão 5, que trata de bioeconomia, descarbonização e transição e segurança energéticas (Hamatsu e Souza, 2024). Assim, a NIB tende a fortalecer e priorizar a cadeia existente dos biocombustíveis nos próximos anos.

Nesse sentido, segundo Hamatsu e Souza (2024), a Finep, empresa pública responsável pelo financiamento de atividades de ciência, tecnologia e inovação, se alinhou ao NIB e tem priorizado a temática dos biocombustíveis. Entre os temas mais relevantes da sua carteira contratada em transição energética, o etanol aparece em primeiro lugar, seguido por produtos químicos de base renovável e biodiesel em quarto.

Vale também destacar que a Finep lançou a chamada pública "Mais Inovação Bioeconomia", que destina recursos não reembolsáveis para projetos de inovação (Hamatsu e Souza, 2024). Com foco em processos biotecnológicos para a produção de biocombustíveis e combustíveis sustentáveis, essa iniciativa amplia as oportunidades para o Brasil, permitindo que o país se posicione não apenas como líder em biocombustíveis convencionais (etanol e biodiesel), mas também em alternativas promissoras que serão apresentadas a seguir.

2.3 Oportunidades

Diante da crescente demanda energética e dos compromissos com a descarbonização, o Brasil se destaca como referência global ao desenvolver, em larga escala, alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis, resultado de investimentos contínuos em inovação e P&D voltados ao setor de transportes (Távora, 2011).

Apesar de apenas 15% do território brasileiro ser destinado à agricultura, avanços tecnológicos permitiram ganhos significativos de produtividade, especialmente na cana-de-açúcar, cuja média saltou de 46,8 para 85,6 t/ha entre 1975/76 e 2022/23 — um aumento de 83%, conforme apresentado na tabela 2. Esse incremento resultou na

produção adicional de 4,6 bilhões de litros de biocombustíveis, evidenciando o potencial de expansão da oferta sem necessidade de novas áreas agrícolas (EPE, 2024).

Tabela 2: Ganho de produtividade estimado e produção incremental do biocombustível

Produtividade	1975/76	2022/23	Ganho (1975-2023)	Produção incremental de biocombustíveis
Cana (t/ha)	46,8	85,6	83%	4.637

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do EPE

Assim, com práticas de uso sustentável da terra, o Brasil pode ampliar em até 80% sua capacidade atual de produção de biocombustíveis — cerca de 25 bilhões de litros adicionais — sem pressionar novas áreas. Essa intensificação também traz benefícios como maior oferta de coprodutos alimentares, retenção de carbono no solo e melhoria na qualidade do solo e da água (EPE, 2024).

Outros subprodutos se originam do aproveitamento de resíduos agrícolas se destacam na produção nacional no que tange à inovação sustentável nesse setor, como Diesel Verde, Etanol de Segunda Geração e Hidrogênio Verde, os quais serão aprofundados a seguir.

2.3.1 Diesel Verde

O Diesel Verde é um biocombustível de segunda geração que pode substituir o diesel fóssil em motores convencionais sem adaptações. Possui composição semelhante à do diesel, mas com vantagens como maior número de cetanos e menores emissões de GEE — podendo chegar a reduções de até 90%. Já adotado nos Estados Unidos e na União Europeia, representa uma alternativa promissora para o Brasil, alinhando-se às metas do RenovaBio e aos princípios da química verde — que busca aproveitar resíduos agroindustriais como matérias-primas (Neves e Harder, 2021).

2.3.2 Etanol de Segunda Geração (E2G)

A outra importante inovação no âmbito dos biocombustíveis, e que ganha bastante destaque, é o Etanol de Segunda Geração (E2G), que se trata da utilização de biomassa vegetal lignocelulósica, como o bagaço e a palha da cana de açúcar para sua produção, ao contrário do Etanol de Primeira Geração (E1G), que utiliza a cana diretamente. Sua fabricação gira em torno da Biorefinaria, que busca melhor aproveitamento de resíduos de ciclos agroindustriais, no caso, o ciclo sucroalcooleiro.

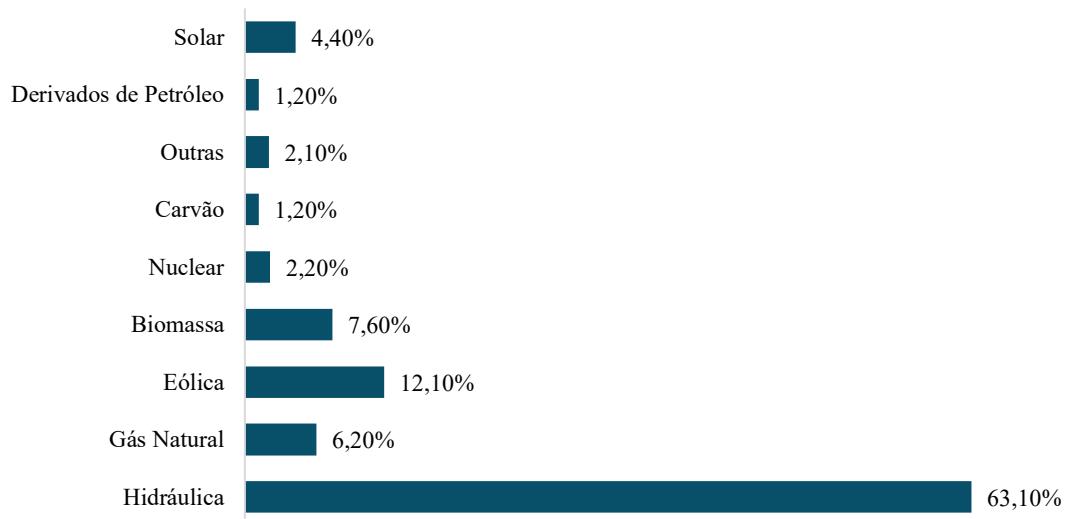
Ela possui uma pegada de carbono 80% menor que a gasolina comum brasileira e 30% menor que o E1G.

Nesse cenário, a Raízen, principal produtora de etanol da cana-de-açúcar do mundo, busca também se destacar como líder na indústria internacional sustentável por meio da introdução desse novo tipo de etanol (Rossoni et al. 2025). Assim, a empresa propõe construir nove unidades de etanol de segunda geração (E2G) e planeja construir outras onze, totalizando 20 unidades que poderão produzir 1,6 mil milhões de litros por ano (Raízen, 2024).

2.3.3 Hidrogênio Verde

Outra tecnologia é o hidrogênio verde, que se configura como uma alternativa tecnológica promissora para a matriz energética nacional, considerando a disponibilidade brasileira de recursos fósseis e, sobretudo, renováveis, conforme demonstrado no gráfico 14. Sua aplicação é estratégica em setores com restrições à eletrificação direta nos curto e médio prazos, como os transportes aéreo, de longa distância, de cargas pesadas e marítimo (Lara & Richter, 2023).

Gráfico 14: Composição da fonte de geração elétrica brasileira em 2022 (em %)



Fonte: Elaboração própria com base nos dados da ANEEL

Nesse contexto, a tecnologia *power-to-gas* apresenta elevada eficiência energética e viabilidade ambiental, especialmente quando associada ao aproveitamento

de excedentes elétricos provenientes de fontes renováveis, como a solar, eólica e hidráulica, amplamente disponíveis no Brasil (Lara & Richter, 2023).

Ele pode ser empregado diretamente como vetor energético final ou convertido em derivados como combustíveis líquidos – sendo este uma das principais aplicações do hidrogênio no contexto energético contemporâneo conhecido como o “hidrogênio como combustível” –, eletricidade ou insumos químicos estratégicos, a exemplo da amônia e do metanol (Lara & Ritcher, 2023).

Diante do cenário analisado, torna-se evidente o expressivo potencial do Brasil para liderar iniciativas de desenvolvimento sustentável, alicerçado em uma matriz energética ampla, diversificada e majoritariamente renovável. O histórico de consolidação da indústria de biocombustíveis, com destaque para a cadeia sucroenergética, confere ao país uma posição estratégica frente à transição energética global, especialmente por sua reduzida dependência de combustíveis fósseis e pela estrutura institucional que sustenta políticas consistentes de incentivo à produção e uso de etanol e biodiesel.

Assim, a própria valorização dos biocombustíveis e de inovações como o etanol de segunda geração e o hidrogênio verde ilustra a lógica da *eco-inovação* (Barbieri, 2010), que busca aliar eficiência econômica à mitigação dos impactos ambientais, integrando sustentabilidade e competitividade. Ou seja, nesse contexto, tecnologias baseadas em biomassa, hidrogênio verde e outras fontes limpas despontam como alternativas promissoras para impulsionar um modelo de desenvolvimento verde, mesmo diante de entraves estruturais como a primarização das exportações e o processo de desindustrialização.

Além disso, esses avanços tecnológicos em biomassa corroboram a visão de Dosi (1981) de que a inovação é um processo cumulativo, guiado por "paradigmas tecnológicos" que delimitam as fronteiras da pesquisa e do desenvolvimento.

Dessa forma, é fundamental que o Brasil preserve e amplie sua trajetória de liderança ambiental, direcionando esforços estratégicos à modernização tecnológica e à construção de ecossistemas inovadores, que permitam aliar crescimento econômico à sustentabilidade de longo prazo.

CAPÍTULO 3: DESAFIOS PARA A ELETRIFICAÇÃO VEICULAR NO BRASIL

Esse capítulo busca apresentar os desafios enfrentados para obter uma transição energética baseada na eletromobilidade em larga escala, bem como suas características e comparações envolvendo os veículos com motor à combustão interna e híbridos.

3.1 História dos VEs

O advento oficial do automóvel elétrico remonta a 1890, nos Estados Unidos, com o desenvolvimento do primeiro veículo projetado especificamente para operar por meio de propulsão elétrica – embora registros anteriores indiquem que, em 1881, na França, foi construída uma versão primitiva de veículo elétrico a partir da modificação de uma charrete convencional (Cabral Neto, 2021; CWR Engenharia, 2025).

À princípio, esses veículos possuíam bastante sucesso já que, adquiriam uma tecnologia superior às demais opções de veículos, e seus fabricantes, por sua vez, buscavam vender produtos com elevados preços aos consumidores de alto poder aquisitivo, ou seja, a sua venda estava relacionada ao status social que o veículo elétrico proporcionava (Cabral Neto, 2021).

No entanto, o seu crescimento não obteve êxito porque o desenvolvimento da produção elétrica não teve o mesmo crescimento e desenvolvimento ao longo dos anos. Além disso, o problema elétrico se mostrava como um dos principais fatores problemáticos do seu sucesso, visto que, em muitas regiões não havia linhas de transmissão que pudessem levar a energia dos pontos de geração aos grandes centros que ficavam afastados (Cabral Neto, 2021).

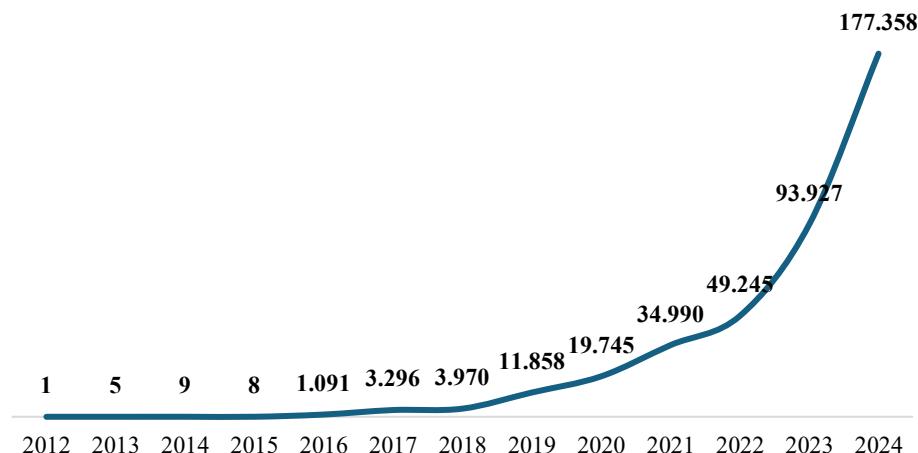
Paralelamente, a gasolina era transportada facilmente para qualquer lugar, o que fez com que sua venda e consumo fossem o foco produtivo em praticamente todo o mundo (Cabral Neto, 2021).

Assim, a expansão da indústria petrolífera, acompanhada pela consequente redução dos preços dos combustíveis, aliada à produção em massa de veículos a combustão pela Ford e à introdução do motor de partida elétrica — que eliminou a necessidade do acionamento manual dos motores —, configuraram-se como fatores determinantes para o retrocesso no desenvolvimento e na adoção dos veículos elétricos (CRW Engenharia, 2025).

Outro fator prejudicial para o seu avanço do século XX foi a sua baixa autonomia por causa da pouca capacidade de armazenamento de energia de suas baterias, enquanto os dos veículos à combustão a autonomia era maior.

Todavia, conforme observado no gráfico 15, a partir de 2020 o seu consumo no Brasil obteve um crescimento relevante, bem como sua produção. Isso se deu por diversos fatores: a busca pela descarbonização e por alternativas renováveis no setor de transportes, e os avanços na tecnologia presentes nos VEs e nas baterias.

Gráfico 15: Série histórica de vendas de veículos leves eletrificados no Brasil



Fonte: Elaboração própria com base nos dados do ABVE (2024)

Atualmente, a efetivação da instalação da fábrica da empresa BYD (*Build Your Dreams*), produtora de carros elétricos e tecnologias relacionadas, em Camaçari (BA) marca um grande avanço para a sua produção e, consequentemente, consumo no país (Ferreira, 2025).

3.2 Características e comparações

Enquanto os veículos convencionais são equipados com motores a combustão interna e utilizam combustíveis como gasolina, etanol ou diesel armazenados em tanques, os veículos elétricos (VEs) operam por meio de motores elétricos alimentados por eletricidade armazenada em baterias (Ribeiro, 2024).

Uma característica marcante dos VEs é a frenagem regenerativa, mecanismo pelo qual, ao se acionar o freio mecânico, a energia cinética — que seria normalmente

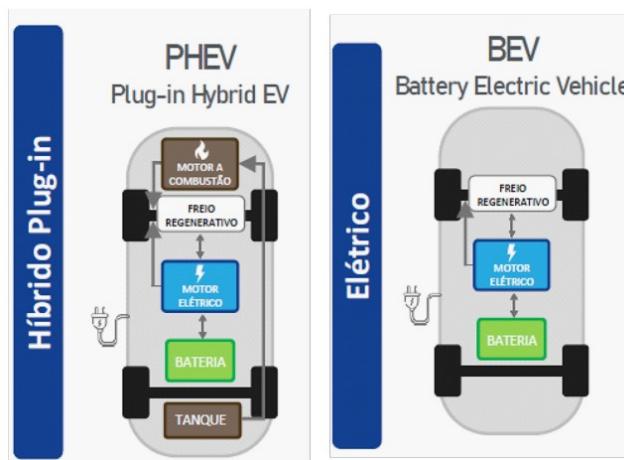
dissipada em forma de calor — é convertida em energia elétrica. Isso ocorre porque o motor de tração atua como um gerador, redirecionando essa energia para as baterias do veículo (Barassa et al., 2021, apud Ribeiro, 2024, p. 7).

Nos grandes centros urbanos, onde o tráfego intenso resulta em longos períodos de parada, destaca-se outro diferencial relevante dos VEs: o consumo energético em marcha lenta. Enquanto os veículos a combustão interna continuam consumindo combustível mesmo quando parados, os VEs apresentam consumo mínimo ou nulo nessas condições, contribuindo para maior eficiência energética (Santos et al., 2020).

Com os avanços tecnológicos, existem hoje diversas configurações de veículos elétricos, incluindo os chamados híbridos, que variam quanto ao grau de hibridização. Enquanto os veículos puramente elétricos são propulsionados exclusivamente por motores elétricos e dependem unicamente de energia elétrica, os híbridos combinam motores elétricos com motores a combustão interna, podendo operar alternadamente ou de forma conjunta.

Entre os veículos eletrificados, destacam-se os veículos elétricos plug-in (*Plug-in Electric Vehicles – PEVs*), que necessitam de infraestrutura externa para recarga, e por isso, serão o foco deste estudo. Os *PEVs* subdividem-se em duas categorias principais: o Veículo Elétrico a Bateria (*Battery Electric Vehicle – BEV*) e o Veículo Híbrido Plug-in (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle – PHEV*). Na imagem a seguir, é possível perceber as principais diferenças entre seus sistemas de propulsão (Ribeiro, 2024).

Imagen 1: Comparação entre as arquiteturas de veículos elétricos Plug-In.



Fonte: AEA (2023) e Ribeiro (2024)

Os PHEV e BEV foram os produtos mais vendidos no ano de 2024, segundo dados da Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE). Em seguida, os HEV (*hybrid electric vehicle*) flex se posicionaram como o terceiro carro mais vendido, conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3: Vendas por tecnologia (acumulado jan a dez/2024)

Participação de mercado dos eletrificados por tecnologia		
PHEV	64.009	36,09%
BEV	61.615	34,74%
HEV flex	20.277	11,43%
MHEV	16.185	9,13%
HEV	15.271	9,13%

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do ABVE

Diante da diversidade de VEs e de seus objetivos comuns, é importante considerar que o grau de sustentabilidade varia entre as tecnologias. Assim, as emissões de gases de efeito estufa diferem ao longo de todo o ciclo de vida, desde a produção até o descarte, como será apresentado a seguir em uma comparação entre veículos convencionais movidos a biocombustíveis e os variados elétricos.

3.2.1 Ciclo de vida do CO₂

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia empregada para quantificar os impactos ambientais ao longo de todas as etapas do ciclo de vida dos veículos de passeio, sejam elétricos, híbridos ou movidos à combustão. A ferramenta foca na estimativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE), orientando escolhas mais sustentáveis (IEA, 2024).

Dentro dessa perspectiva, Mera et al. (2023) realizou um estudo de ACV comparando o ciclo de vida de *ICEVs flex* – alimentados por gasolina e etanol – e *BEVs* nos segmentos de compactos, médios e SUVs compactos, e quando possível, *HEVs*, *PHEVs* e *FCEVs* (*fuel cell electric vehicles*) a hidrogênio, para identificar quais os tipos de motorização e rotas de produção de energia permitem maior redução das emissões de GEE de carros de passeio no país. As características de cada um deles está representada na tabela 4 abaixo.

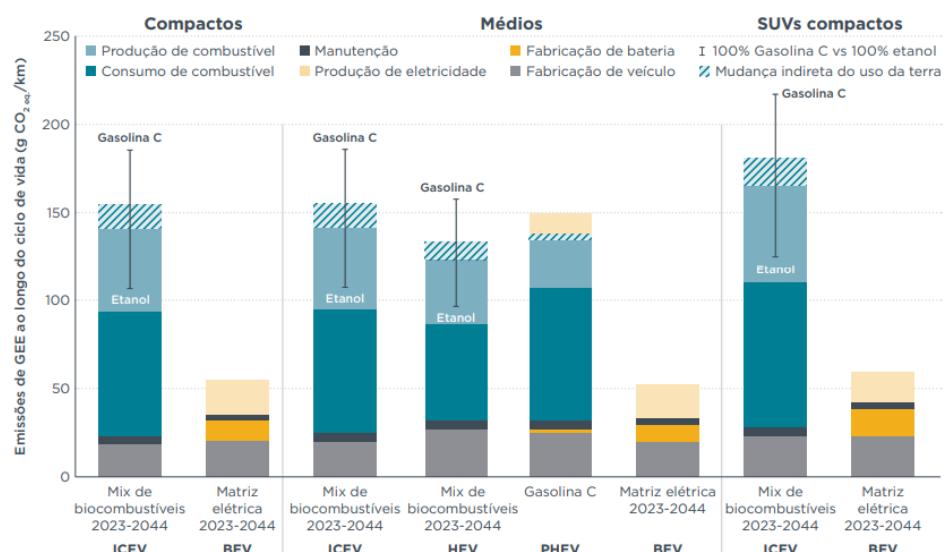
Tabela 4: Características dos veículos dos segmentos compacto, médio e SUV compacto

Segmento	Tipo de motorização	Potência do motor (kW)	Peso em ordem de marcha (kg)
Compacto	ICEV flex	66	1.039
	BEV	100	1.455
Médio	ICEV flex	80	1.100
	HEV	95	1.415
	PHEV	169 + 65	1.390
	BEV	116	1.390
SUV compacto	ICEV flex	87	1.261
	BEV	110	1.708
	FCEV	120	1.814

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da Mera et al. (2023)

As emissões consideradas na atividade foram as de escapamento, da produção de combustível e de eletricidade e da fabricação de veículos e baterias, e a utilização de comparação foi a grama de CO₂ equivalente por quilômetro percorrido durante a vida útil dos veículos (gCO₂/km). Foi considerada também a manutenção dos veículos, que está relacionado com a substituição de componentes – pneus, sistemas de pós-tratamento de escapamento, líquido de arrefecimento e óleo (Mera et al., 2023).

Imagem 2: Emissões de ciclo de vida de alguns segmentos comercializados no Brasil em 2023.



Fonte: Mera et al. (2023)

Na imagem 2 acima é possível visualizar o resultado do estudo da Meta et al. (2023), em que é apresentada as emissões de ciclo de vida de emissões de gases de efeito estufa (GEE) de ICEVs flex e BEVs dos segmentos compacto, médio e SUV compacto, bem como de HEVs e PHEVs do segmento médio, comercializados no Brasil em 2023. As barras de erro indicam os casos de operação exclusiva com gasolina C (valor mais alto) ou etanol hidratado (valor mais baixo).

Assim, sua análise das emissões de GEE ao longo do ciclo de vida revelou que os veículos elétricos a bateria (BEVs) apresentam o menor impacto ambiental entre todas as tecnologias avaliadas, independentemente do segmento veicular. Embora a fabricação de baterias contribua significativamente para as emissões iniciais, essa desvantagem é compensada pela ausência de emissões diretas durante o uso e pela baixa intensidade de carbono da matriz elétrica brasileira projetada para 2023–2044.

Assim, os BEVs se destacam como a alternativa mais sustentável do ponto de vista climático, sobretudo quando comparados aos veículos com motorização exclusivamente a combustão interna (ICEVs), que concentram suas emissões no consumo e produção de combustíveis fósseis (Mera et al., 2023)

Por sua vez, os veículos híbridos convencionais (HEVs) e híbridos plug-in (PHEVs) apresentam apenas reduções parciais nas emissões, visto que, ainda dependem majoritariamente de combustíveis líquidos para operação. Os ICEVs permanecem como os maiores emissores de GEE ao longo do ciclo de vida, com destaque para os modelos SUV compactos, cujas emissões ultrapassam 200 g CO₂eq/km em cenários de uso exclusivo de gasolina (Mera et al., 2023).

Observa-se, ainda, que a substituição da gasolina por etanol reduz consideravelmente o impacto ambiental nos veículos com motor a combustão, o que reforça a importância da adoção de biocombustíveis como estratégia intermediária de mitigação, embora essa medida seja menos eficaz para um ciclo de vida menos poluente do que a eletrificação plena da frota.

Portanto, assim como a literatura destaca, a viabilidade das eco-inovações depende de soluções técnica e ambientalmente adequadas, exigindo uma abordagem sistêmica que considere custos, riscos e impactos colaterais, pois mesmo alternativas sustentáveis podem gerar efeitos negativos (Kemp & Pearson, 2007).

3.3 Limitações para a expansão dos VEs

A matriz energética brasileira é predominantemente renovável e os veículos elétricos a bateria (*BEVs*) apresentem vantagens – quando comparados aos veículos convencionais à combustão interna – em termos de eficiência energética e menores emissões ao longo do ciclo de vida. Assim, questiona-se: o que impede a consolidação em larga escala desses automotores no Brasil? Para responder a essa pergunta, a seguir serão analisadas principais entraves e desafios enfrentados pela eletrificação veicular no país, especialmente nos âmbitos institucional e de infraestrutura.

3.3.1 Limitações institucionais

As políticas públicas se mostram fundamentais para a expansão e consolidação de novas tecnologias, principalmente no ramo automobilístico. Dessa forma, Brandão e Lima (2025) realizaram um estudo comparando políticas de eletrificação de algumas nações com o Brasil e identificaram barreiras institucionais no país que envolvem a influência de uma rede de atores e seus interesses, como foi tratado por Andrade (2006) e Callon (1987), que dificultam a introdução em larga escala dessa tecnologia.

Inicialmente, na China – país líder mundial na produção e venda de veículos elétricos –, o alinhamento e centralização governamental resultaram em um ambiente regulatório favorável e satisfatório para a expansão da eletrificação veicular, com incentivos fiscais, subsídios e investimentos em sua infraestrutura de recarga. Destacam-se, no contexto chinês, as políticas públicas como o programa *New Energy Vehicle (NEV) Program* (2025-2035) e o *China EV Charging Infrastructure Plan* (2021–2025), caracterizadas pela oferta de subsídios diretos, definição de metas obrigatórias de produção e aportes significativos em infraestrutura de recarga (*International Energy Agency*, 2023; Brandão e Lima, 2025).

Essas iniciativas foram fundamentais para a consolidação e estabilidade do mercado de veículos elétricos no país, ao alinhar incentivos econômicos com diretrizes estratégicas de longo prazo (Brandão e Lima, 2025). Adicionalmente, elas demonstram como as associações entre um grupo de atores com poder dominante e influente são cruciais para o sucesso de uma inovação, um conceito alinhado à Teoria Ator-Rede de Callon (1987). Essa dinâmica garante um ambiente institucional favorável para a tecnológica elétrica, conforme destacado por Andrade (2006) e reflete a articulação e o alinhamento estratégico tratados por Wolffenbuttel (2022).

Nos Estados Unidos, por outro lado, a expansão da eletrificação foi impulsionada predominantemente por iniciativas do setor privado e por incentivos fiscais descentralizados, como o *Inflation Reduction Act* (IRA) e o *Bipartisan Infrastructure Law* (BIL), que fomentam tanto a aquisição de veículos elétricos, quanto a ampliação da infraestrutura de recarga. No entanto, a falta de uma política nacional integrada acarreta uma fragmentação institucional e limita a velocidade da adoção da tecnologia, permitindo que empresas como Tesla e Rivian se destaquem por meio de inovações disruptivas e redes de recarga próprias.

Ademais, o governo dos Estados Unidos aprovou, em julho de 2025, a eliminação gradual dos créditos fiscais federais para veículos elétricos, encerrando subsídios de até US\$ 7.500 para novos e US\$ 4.000 para usados, além de abolir incentivos para veículos comerciais e contratos de leasing. A medida deve provocar uma desaceleração na adoção dos VEs, o que impacta negativamente investimentos e a competitividade do setor (Axios, 2025; Monteiro, 2024).

Em consonância com a teoria, esse marco relevante de ruptura institucional estadunidense demonstra a falta de um alinhamento estratégico entre as redes de atores, como foi reforçado por Wolffenbuttel (2022), visto que, segundo esse autor, esse alinhamento é essencial para criar uma forte articulação capaz de refletir em avanços tecnológicos e inovativos. No entanto, enquanto China e EUA oferecem modelos contrastantes de eletrificação, a situação brasileira revela desafios únicos, influenciados por uma complexa rede de atores e interesses institucionais.

Assim, no cenário brasileiro, políticas como o Plataforma Nacional de Eletromobilidade (PNME) – entidade que reúne diversos representantes de órgãos governamentais, indústrias e universidades, e que é responsável pela criação e execução de políticas e ações para o desenvolvimento da mobilidade elétrica no país –, e o Rota 2030 (2018-2032) – que visa modernizar a indústria automotiva e incorporar eficiência energética e políticas ambientais ao setor –, refletem a tendência do setor automotivo à eletrificação veicular.

No gráfico 5 a seguir, são apresentadas algumas das principais políticas públicas na China, Estados Unidos e Brasil, a fim de demonstrar a forte tendência existente nesse setor de veículos elétricos e a articulação institucional envolvida.

Tabela 5: Políticas públicas para a eletrificação veicular na China, Estados Unidos e Brasil

País	Política Pública	Descrição
China	<i>New Energy Vehicle (NEV) Program (2021-2035)</i>	Define metas obrigatórias de fabricação de veículos elétricos, acompanhadas de créditos produtivos, subsídios diretos e estímulos tributários.
	<i>China EV Charging Infrastructure Plan (2021- 2025)</i>	Planeja a instalação de 12.000 estações de recarga até 2025, sustentando o crescimento da frota elétrica.
Estados Unidos	<i>Inflation Reduction Act (IRA) - 2022</i>	Oferece incentivos fiscais de aproximadamente 393 bilhões em créditos e benefícios para a aquisição de veículos elétricos e estimula a fabricação nacional de baterias e a expansão da infraestrutura de recarga.
	<i>Bipartisan Infrastructure Law (BIL) - 2021</i>	Aloca US\$ 7,5 bilhões para o estabelecimento de uma infraestrutura nacional de recarga e o estímulo à expansão da mobilidade elétrica.
Brasil	Mobilidade Verde (MOVER)	Iniciativa que incentiva o desenvolvimento de tecnologias veiculares de baixa emissão, com ênfase na eletrificação da frota por meio de automóveis elétricos e híbridos.
	Rota 2030	Concede benefícios tributários voltados à promoção da inovação tecnológica e ao aprimoramento da eficiência energética na fabricação de veículos híbridos e elétricos.
	Programa Nacional de Eletromobilidade (PNME)	Iniciativa que impulsiona a mobilidade elétrica no Brasil por meio de políticas públicas, regulação e fomento à pesquisa e desenvolvimento.

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do Brandão e Lima (2025), ICCT (2021), IEA (2022)

No entanto, as políticas brasileiras carecem de coordenação e integração para criar um ecossistema que favoreça a eletrificação (Wolffenbuttel, 2022). Segundo Brandão e Lima (2025), elas são fortemente influenciadas por grupos de interesses corporativos como a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), que tendem a restringir avanços tecnológicos mais disruptivos ao privilegiarem medidas voltadas à salvaguarda da competitividade da indústria nacional (Brandão e Lima, 2025).

No que diz respeito a esses grupos de poder dominante, como a ANFAVEA, se remonta diretamente aos conceitos institucionais trabalhados pelo Callon (1987), North (1990) e Andrade (2006), visto que eles dinamizam e determinam os caminhos da inovação conforme seus interesses. Dessa forma, a eletrificação veicular encontra barreiras institucionais, e requer esforços maiores para conseguir dar continuidade em um processo de expansão mais abrupto.

É importante também destacar, no cenário regulatório brasileiro, a Resolução Normativa ANEEL nº 819, que regulamenta a atividade de recarga veicular, incentiva o surgimento de mercado de recarga e fortalece a legitimidade da tecnologia elétrica.

Porém, não há metas nacionais específicas ou diretrizes claras para a infraestrutura de recarga, o que reforça a falta de articulação interna (Wolffenbuttel, 2022).

Um outro marco institucional importante no processo de eletrificação veicular no Brasil é a atuação de novos atores no setor automotivo, como a Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE) e a Associação Brasileira dos Proprietários de Veículos Elétricos Inovadores (ABRAVEi). Essas entidades exercem papel fundamental na legitimação da tecnologia, ao assumirem riscos e apoiarem sua difusão em um mercado ainda incipiente (Wolffenbüttel, 2022).

Nesse sentido, elas atuam como empreendedores institucionais, promovendo a aceitação dos veículos elétricos por meio de ações de *lobby*, articulação política e organização de eventos e feiras que divulgam seus benefícios e viabilidade junto ao público e aos formuladores de políticas (Wolffenbüttel, 2022). Esse fato remonta justamente ao que o Callon (1987) apresenta como Teoria Ator-rede, em que os atores formam *lobbys* privados e conseguem fortificar suas inovações.

Contudo, no cenário internacional, segundo o *Global EV Outlook 2022* da IEA, em 2021, os gastos com subsídios e incentivos para veículos elétricos em outros países foram muito maiores, alcançando quase 30 bilhões de dólares. Dentre esses investimentos destacam-se a alocação de aproximadamente 28 bilhões em subsídios e isenções fiscais entre 2009 e 2022, sendo esse valor concentrado sobretudo em 2022 e 2023 na China. Ademais, por meio do *Inflation Reduction Act* (IRA) de 2022, os Estados Unidos se comprometeram com cerca de 393 bilhões em créditos e benefícios fiscais para EVs entre 2023 e 2032 (Andrade, 2023; IEA, 2022).

Ou seja, subsídios e incentivos realizados pelo Brasil ainda são baixos comparados aos da China e Estados Unidos.

Além disso, existem alguns incentivos regulatórios e outros governamentais no Brasil, como a isenção de IPVA (Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores), rodízio e cortes pontuais na alíquota de importação. Mas, segundo Andrade, 2023, se revelam limitados e transitórios, sem um plano de apoio de longo prazo.

Dessa forma, comprehende-se que o Brasil é considerado ainda muito dependente de incentivos fiscais e subsídios ao setor automotivo elétrico, o que significa que ele está em uma fase ainda muito vulnerável, principalmente ao observar as incertezas e oscilações no mercado internacional atual.

Assim, segundo Andrade (2023), o Brasil se posiciona em uma situação inferior à China e Estados Unidos no quesito adoção de veículos elétricos devido à inexistência de uma política robusta que sustente a produção e consumo desses carros movidos a eletricidade, e devido à quantidade baixa de incentivos fiscais – esses que funcionam somente como uma estratégia de curto prazo.

Ademais, Wolffbuttel (2022) sugere que o Brasil enfrenta dificuldades na eletrificação porque sua infraestrutura institucional não está alinhada com os requisitos para o desenvolvimento e adoção de veículos elétricos. Para ele, o desenvolvimento e a adoção de novas tecnologias dependem de um conjunto de elementos interconectados (atores, redes e instituições).

“(...) destacam-se na infraestrutura institucional brasileira outras políticas recentes de estímulo à produção e ao consumo de veículos elétricos. Porém, ressalta-se um baixo nível de articulação entre as políticas de mobilidade (...)" (Coelho; Abreu, 2019, apud Wolffbuttel, 2022, p. 22).

Sob essa perspectiva, assim como Andrade (2023), o estudo de Wolffbuttel (2022) prova que existem barreiras regulatórias, incentivos insuficientes e falta de coordenação entre os setores que deveriam impulsionar essa transição.

Por fim, a Teoria Ator-Rede de Callon (1987) também contribui para explicar essa limitação de expansão dos VEs no Brasil, já que argumenta que essa construção coletiva de uma rede heterogênea, permeada por negociações, controvérsias e adaptações, reflete em disputas de poder e de interesses diversos de cada ator envolvido, dificultando uma boa articulação voltada a essa nova tecnologia.

3.3.2 Limitações de infraestrutura

Sabe-se que os veículos elétricos plug-in (*Plug-in Electric Vehicles – PEV*), utilizados nesse estudo, usufruem de uma infraestrutura de recarga externa. Dessa forma, é de extrema importância que um alto consumo dessas tecnologias aconteça com a sustentação de uma boa infraestrutura de recarga.

Em uma análise sobre eletrificação veicular em larga escala na China, Li et al. (2021) realçou a importância dos investimentos em infraestrutura, pois, a partir de seu estudo, concluiu que, mesmo com a obtenção de políticas e isenções voltadas aos VEs,

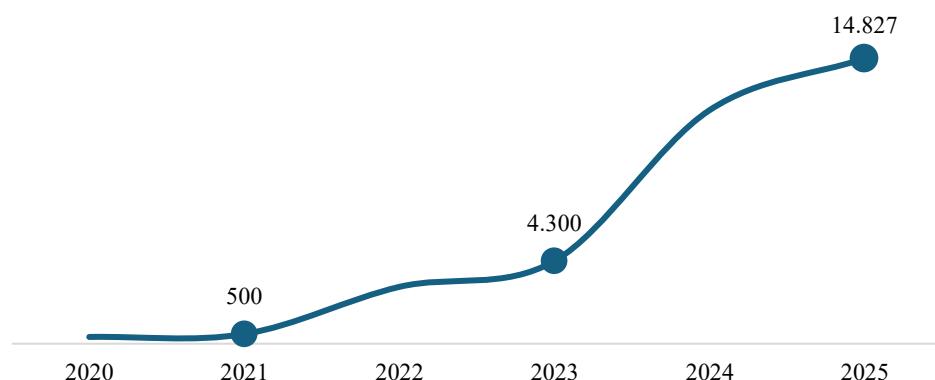
o que de fato resultou na expansão das vendas desses veículos em larga escala foram os investimentos em infraestrutura de recarga.

“A decisão de adoção por parte dos consumidores depende, em certa medida, da disponibilidade e da cobertura da infraestrutura de recarga, enquanto a decisão de investir em estações de recarga depende, em certa medida, do número de veículos elétricos que as utilizarão.” (Li et al., 2021, p. 7; Tradução Própria).

Assim, os investimentos em infraestrutura de recarga na China se mostraram muito mais eficazes em termos de custo-benefício do que os subsídios aos consumidores, embora estes também tenham sido importantes (Li et al, 2021). No entanto, de acordo com Brandão e Lima (2025) e Reis e Ferretti (2024), a estrutura brasileira se difere substancialmente da estrutura chinesa, pois não possui a infraestrutura física necessária para a absorção dessa tecnologia em larga escala.

Ao observar o cenário brasileiro de infraestrutura, é possível notar um considerável crescimento entre 2020 e 2025 de eletropostos no país, passando de 300 eletropostos em 2020 para 14.827 em 2025, conforme apresentado no gráfico 16 a seguir.

Gráfico 16: Evolução da quantidade de eletropostos no Brasil entre 2020 e 2025

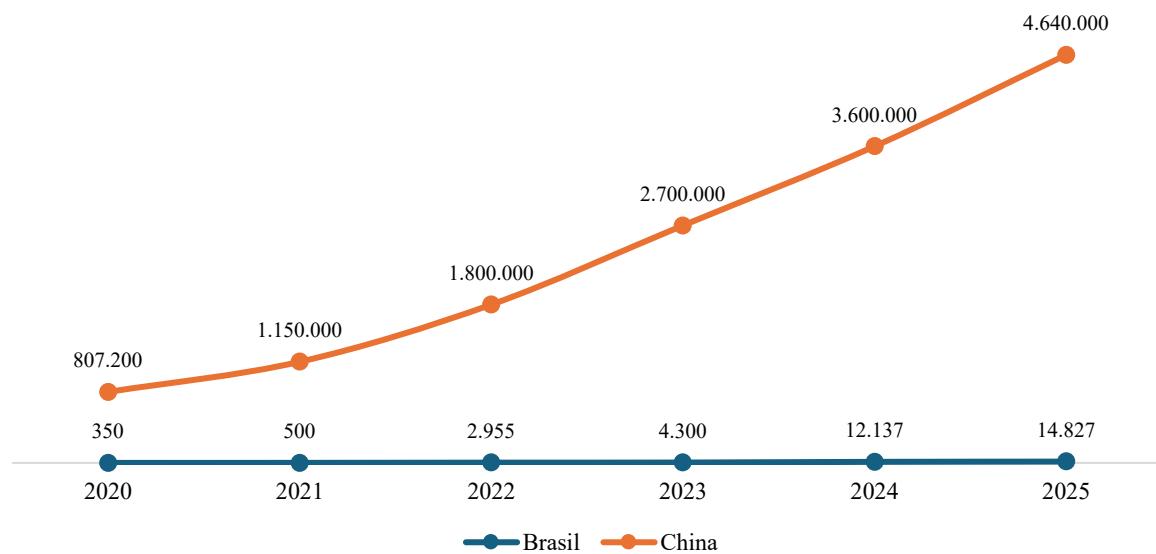


Fonte: Elaboração própria com base nos dados da ABVE (2024)

No entanto, ao comparar o número de estações de recarga de veículos elétricos entre China e Brasil no gráfico 17 abaixo, percebe-se a enorme discrepância em relação à tendência de crescimento apresentados em cada um. Isso revela uma maior eficiência na criação e execução de políticas voltadas à infraestrutura na China, que se deu

principalmente pelo alinhamento e centralização governamental no país, e pela ausência de associações privadas – como a ANFAVEA – dominando o mercado e as inovações no setor automotivo a partir de seus interesses, e dificultando uma integração melhor entre os atores envolvidos (Brandão e Lima, 2025).

Gráfico 17: Comparação da evolução do número de estações de Recarga de Veículos Elétricos entre China e Brasil



Fonte: Elaboração própria com base nos dados da ABVE (2024) e Mordor Intelligence

Além da deficiente infraestrutura de recarga, a forte dependência de importações de baterias e outros componentes, junto com elevados custos de produção e aquisição dos VEs e a limitada exploração estratégica de recursos energéticos renováveis também impactam negativamente o sucesso dessa transição energética (Brandão e Lima, 2025).

No entanto, ainda no que se refere aos aspectos físicos, é importante se atentar à alta demanda energética e necessidade de investimentos em infraestrutura elétrica, que também revelam ser algumas das principais limitações físicas existentes.

Nesse sentido, ao introduzir em larga escala os VEs, surgem dificuldades relacionadas à demanda de energia e à capacidade de geração. Os carregadores dos veículos elétricos a bateria (*BEVs*), quando comparados aos dispositivos convencionais de carregamento residenciais, possuem uma demanda por energia muito maior, principalmente em cenários de “horários de pico”.

Para Castilho (2017) a questão elétrica se torna mais uma contradição e dilema para a adoção da eletrificação no Brasil, pois, pelo modelo do sistema elétrico estar fortemente conectado ao setor industrial como um todo, como exemplo a indústria de bens de capital, ele tende a gerar consequências socioambientais relacionados a essa alta quantidade energética demandada.

Dessa forma, mesmo com uma matriz energética renovável, ficará cada vez mais difícil suportar a enorme demanda. Segundo projeções da consultoria PricewaterhouseCoopers (PwC), a inserção de aproximadamente 35 milhões de veículos elétricos (VEs) na frota nacional até 2040 poderá resultar em um acréscimo de 14% na demanda energética do Brasil. Esse crescimento no consumo de eletricidade tende a exercer pressão significativa sobre o sistema elétrico, podendo ocasionar aumentos substanciais nos preços da energia, bem como comprometer a qualidade do fornecimento.

Por exemplo, a expectativa que a instalação da fábrica da empresa chinesa BYD no Brasil aumente a sua produção, barateie os veículos e impulsione seu consumo, exige maior atenção às políticas nacionais de infraestrutura (Ferreira, 2025). Nesse contexto, torna-se essencial investir de forma robusta na rede elétrica para garantir sua capacidade de atender à nova demanda sem risco de sobrecarga.

3.3.3 Baterias como um entrave

Os veículos elétricos utilizam diferentes tipos de baterias, como íon-lítio, íon-lítio-cobalto, níquel-hidreto metálico (NiMH) e chumbo-ácido, todas com limitações relacionadas ao custo, autonomia e vida útil. As NiMH apresentam boa durabilidade, mas são caras e ineficientes por não permitirem descarga total. Já as chumbo-ácido, embora recicláveis, possuem alto impacto ambiental devido ao chumbo e ao ácido sulfúrico (Santos et al., 2020).

As baterias de íon-lítio, predominantes no mercado, destacam-se pela alta densidade energética e estabilidade térmica. O subtipo íon-lítio-cobalto é o que oferece maior energia específica, mas sua produção acarreta impactos ambientais expressivos devido à escassez e exploração do cobalto (Santos et al., 2020). Dada sua ampla utilização, este trabalho adota a bateria íon-lítio como objeto de análise.

Essas baterias são centrais na transição energética por oferecerem longa vida útil e alta densidade energética. Contudo, sofrem degradação com o uso, manifestada na perda de capacidade e aumento da resistência interna (Zhou et al., 2025). Quando a

capacidade cai abaixo de 80% ou a resistência interna dobra, considera-se o fim de seu ciclo de vida. Além disso, a estimativa em tempo real da capacidade ainda é limitada, dificultando sua padronização em larga escala.

Dessa forma, a degradação da bateria representa um desafio operacional significativo, especialmente em aplicações logísticas como o Problema de Roteamento de Veículos Elétricos (PRVE), onde a profundidade da descarga impacta diretamente sua vida útil, exigindo estratégias para minimizar esse desgaste (Cavalheiro e Oliveira, 2024; Zhou et al., 2025).

Segundo Rovai (2024), a produção das baterias representa cerca de 30% das emissões de gases de efeito estufa na fabricação dos veículos elétricos, devido ao uso intensivo de energia e matérias-primas como lítio, cobalto e níquel. Esse impacto é ampliado quando a matriz elétrica das fábricas se baseia em fontes fósseis, como o carvão, comprometendo os benefícios ambientais da eletrificação (Rovai, 2024).

Além dos aspectos ambientais, há entraves econômicos e logísticos. A produção nacional de baterias no Brasil é incipiente, gerando dependência de importações, especialmente de países asiáticos como China, Japão e Coreia do Sul, com implicações em custos logísticos, cambiais e geopolíticos (Rovai, 2024). O transporte, descarte e reciclagem dessas baterias exigem infraestrutura adequada e protocolos rigorosos, elevando os custos e a complexidade de gestão.

Outrossim, a ausência de uma cadeia estruturada de reciclagem e de políticas públicas voltadas à logística reversa compromete o reaproveitamento dos materiais, que são escassos e de difícil degradação (Santos et al., 2020). Assim, as baterias se configuram como elementos de alto valor agregado e alta densidade energética, cujos desafios de gestão e descarte impactam diretamente a competitividade da eletromobilidade no Brasil.

Diante disso, é urgente a formulação de políticas industriais e energéticas que estimulem a produção nacional sustentável, fomentem pesquisas em tecnologias de menor impacto ambiental e consolidem práticas de economia circular, reduzindo a dependência de recursos naturais e importações.

3.4 Alternativa: Veículos híbridos *flex* a etanol

Após o entendimento das dificuldades enfrentadas pelos veículos elétricos, os veículos híbridos *flex* a etanol surgem como uma solução ideal ao país. A combinação de motores elétricos com motores a combustão interna posiciona os veículos híbridos

como uma solução estratégica para os desafios do setor automotivo. Eles superam as limitações de autonomia – no momento do abastecimento – e infraestrutura de recarga dos veículos puramente elétricos, ao mesmo tempo em que mitigam as emissões dos motores convencionais.

Ainda, no contexto brasileiro, a integração do motor elétrico com a tecnologia *flex a etanol* – o qual possui um balanço de CO₂ mais favorável que a gasolina – é particularmente promissora. Essa sinergia une uma cadeia energética já consolidada no país, a matriz de biocombustíveis, com uma tecnologia mais eficiente e renovável.

À luz desse cenário, a Finep, alinhada à política NIB, que busca incluir a eletromobilidade e a cadeira produtiva de baterias na agenda de sustentabilidade nacional, lançou a chamada pública "Mais Inovação Mobilidade Urbana", que destina recursos não reembolsáveis para projetos de desenvolvimento de veículos híbridos elétricos que utilizam combustíveis sustentáveis (Hamatsu e Souza, 2024).

Dessa forma, mesmo não sendo considerado a tecnologia mais renovável no aspecto da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) realizada pela Mera et al. (2023), a tecnologia articula bem com todos os investimentos já realizados na indústria de biocombustíveis.

Ademais, como apontado por Reis e Silva (2017), a flexibilidade de abastecimento do carro híbrido é um diferencial que atrai os consumidores, especialmente em um país com as dimensões geográficas do Brasil, onde a escassez de postos de carregamento para veículos elétricos de longa distância é um fator limitante.

Isso pode ser percebido através de dados divulgados pela Federação Nacional de Distribuição de Veículos Automotores (FENABRE), que revelam que as vendas dos veículos híbridos superam as vendas dos veículos 100% elétricos, como pode ser percebido na tabela 5. Segundo o presidente da Fenabrade, Arcelio Junior, os veículos híbridos têm sido a preferência do mercado nacional, em função da infraestrutura de recarga.

Tabela 6: Vendas por propulsão em junho de 2024 e 2025

Tipo de propulsão	jun/25	jun/24	Variação (%)	Acumulado/25	Acumulado/24	Variação (%)
Híbridos	15.268	9.171	66%	82.535	47.836	73%
Elétricos	5.873	5.098	15%	30.362	30.801	-1%
Total	21.141	14.269	48%	112.897	78.637	44%

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da Fenabre (2025)

Assim, por um lado, eles resolvem as desvantagens dos veículos elétricos, como a baixa autonomia e a escassez de pontos de recarga em estradas brasileiras. Por outro lado, mitigam os impactos ambientais dos motores a combustão, ao reduzir as emissões de gases poluentes. Além disso, aproveitam a consolidada matriz de biocombustíveis do país, como o etanol, o que lhes confere uma dupla vantagem sustentável (Cavagliano, 2020).

No entanto, mesmo superando desafios colocados pelos veículos convencionais e os puramente elétricos, os altos custos desses veículos diante de um baixo poder aquisitivo da maior parte da população brasileira se tornam um empecilho para uma expansão da frota de híbridos no país. Segundo dados do IBGE (2024), embora tenha ocorrido um fortalecimento do poder aquisitivo da população brasileira, as desigualdades salariais continuam sendo um fator limitante para o poder de compra de determinados grupos.

Na tabela 7 a seguir verifica-se uma comparação entre os preços dos veículos híbridos *flex* e à combustão da marca Toyota. É necessário ressaltar que essa marca e modelos foram escolhidos devido à falta de marcas no Brasil que vendem o mesmo modelo de carro nas 3 versões (híbrido, puramente elétrico e à combustão interna *flex*) ao mesmo tempo.

Tabela 7: Comparativo de Preços - Toyota Corolla (Modelos 2025)

Tipo de Propulsão	Modelo/Versão	Preços (a partir de)
A Combustão (Flex)	Corolla GLi 2.0L	R\$ 164.590
Híbrido (Flex)	Corolla Altis Hybrid 1.8L	R\$ 199.990

Fonte: Toyota Brasil / Quatro Rodas / Elaboração própria

Percebe-se que o veículo híbrido possui valor mais elevado do que a opção de veículo convencional. Com o objetivo de comparação com a marca de veículos elétricos recém-instalada no país, a seguir é apresentado uma tabela com opções da marca BYD.

Tabela 8: Comparativo de Preços - BYD (Modelos 2025)

Tipo de Propulsão	Modelo	Preços (a partir de)
100% elétrico	Dolphin Mini	R\$ 118.800
	Dolphin	R\$ 159.800
	Seal	R\$ 296.800

Híbrido Plug-in	King	R\$ 169.990
	Song Plus	R\$ 249.990

Fonte: Elaboração própria com base nos dados da BYD Brasil

A análise dos preços da BYD demonstra que, para a marca, o foco não está em competir com veículos a combustão, mas sim em democratizar o acesso à eletrificação. O Dolphin Mini, por exemplo, se posiciona como uma opção 100% elétrica com um preço de entrada bastante competitivo, tornando-o acessível a uma faixa mais ampla de consumidores.

Em contrapartida, a linha híbrida plug-in, como o sedã King e o SUV Song Plus, tem um custo inicial mais elevado em comparação com o Dolphin que se justifica pela combinação de autonomia estendida (graças ao motor a combustão que recarrega a bateria) e maior potência, ideal para quem busca mais versatilidade em longas viagens.

Contudo, os preços podem reduzir. De acordo com Reis e Silva (2017), o uso de um motor híbrido-*flex* a etanol, com peças e tecnologias de origem nacional, resultaria na redução dos preços dos veículos e traria uma vantagem competitiva ao Brasil na busca pela descarbonização.

Nesse contexto, os autores destacam que o aprimoramento dos motores elétricos existentes é fundamental para atender às políticas governamentais de fomento ao desenvolvimento sustentável. Uma vez que o país carece de infraestrutura de recarga para a adoção em larga escala de carros 100% elétricos, o investimento em inovações incrementais, como os veículos híbridos-*flex*, permite o aproveitamento da consolidada matriz de biocombustíveis e um menor impacto de preços aos consumidores.

Assim, confere-se que existe uma necessidade de que o desenvolvimento tecnológico perpetue de maneira mais intensa, para que assim seja possível promover tecnologias mais eficientes no que diz respeito à redução tanto dos custos de produção dos veículos híbridos quanto dos custos ambientais (poluição). Além disso, o fomento governamental por meio de políticas públicas para o setor automotivo deve acontecer para sustentar a construção de um futuro mais eficiente e ecológico para o país.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo de décadas, o Brasil consolidou uma ampla e complexa rede de atores, desde a indústria sucroenergética até o setor automotivo e órgãos governamentais, focada no desenvolvimento dos biocombustíveis. Essa robusta arquitetura institucional, embora represente uma vantagem competitiva no cenário global, também cria uma resistência que dificulta a rápida adoção de novas tecnologias disruptivas, como os veículos elétricos. A conciliação entre esses interesses e o alinhamento com a agenda global de descarbonização se tornam, portanto, o desafio central para a política energética nacional.

Assim, embora o Brasil conte com uma matriz elétrica majoritariamente renovável, o que favorece a eletrificação da mobilidade, ele detém uma matriz energética sustentada pelos biocombustíveis, com produção expressiva de etanol e biodiesel, além de uma frota amplamente composta por veículos *flex fuel* e uma infraestrutura de recarga precária. Assim, essas duas tecnologias sustentáveis — a eletrificação e os biocombustíveis — passam a competir entre si devido às instituições e políticas preexistentes, que priorizam historicamente a bioenergia.

Dessa forma, a transição energética no setor de transportes posiciona o Brasil em uma encruzilhada estratégica e singular: enquanto a matriz de biocombustíveis confere uma vantagem competitiva consolidada, a inércia institucional e os desafios de infraestrutura impõem barreiras à plena adoção dos veículos elétricos. Conclui-se que essa dualidade, enraizada na diversidade estrutural e institucional do país, diferencia a trajetória brasileira de outras nações.

No entanto, apesar das limitações físicas e institucionais, há espaço para a inserção dos veículos elétricos, desde que atuem de forma complementar aos biocombustíveis. Assim, os veículos híbridos com motores *flex* a etanol se revelam como uma grande oportunidade, podendo potencializar tanto a infraestrutura já consolidada quanto os benefícios da eficiência energética dos veículos eletrificados, promovendo um equilíbrio estratégico entre inovação e aproveitamento das capacidades instaladas.

Nesse sentido, a Finep, por meio da chamada "Mais Inovação Mobilidade Urbana", disponibiliza recursos não reembolsáveis para projetos de desenvolvimento de veículos híbridos elétricos com combustíveis sustentáveis, o que indica um alinhamento entre essa tecnologia e os interesses dos atores estatais. Contudo, para que esse

potencial se materialize, avanços efetivos dependerão de políticas públicas que priorizem a expansão da infraestrutura de recarga e o fomento estruturante, em vez de focar apenas em subsídios pontuais.

Portanto, em vez de escolher entre biocombustíveis e eletromobilidade, o país tem a chance de liderar com um modelo híbrido e pioneiro, que integra a base consolidada dos biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel – bem como o hidrogênio verde, o etanol de segunda geração e o diesel verde –, com os avanços da eletrificação. Ao transformar suas particularidades institucionais e tecnológicas em vantagens competitivas, o Brasil não apenas avança rumo a um sistema de transporte de baixo carbono, mas também reafirma seu protagonismo como um agente inovador e estratégico na transição energética global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, Rodrigo. Os desafios para consolidação dos veículos elétricos no Brasil. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Publicado em 05 de julho de 2023

Andrade, Thales Novaes de. Aspectos sociais e tecnológicos das atividades de inovação. Lua Nova, São Paulo, n. 66, p. 139-164, 2006.

Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE). Infraestrutura de recarga acelera no país e apresenta crescimento de 179%. Revista ABVE, 7 out. 2024.

Axios. *U.S. electric vehicle (EV) sales saw a 6.3% drop... driven by impending cuts to federal purchase subsidies.* Axios, 2025.

Barbieri, J. C; Vasconcelos, I. F. G; Andreassi, T; Vasconcelos, F. C. Inovação e Sustentabilidade: novos modelos e proposições. RAE, São Paulo, v. 50, N. 2, Abr/ Jun, p. 2-8, 2010.

BNDES. Apresentação BNDES RenovaBio externo. Rio de Janeiro: BNDES, 2023.

Branco, Luizella Giardino Barbosa. Biocombustíveis: vantagens e desafios. Revista Eletrônica de Energia, Salvador, v. 3, n. 1, p. 16-31, jan./dez. 2013.

Brandão, Vinícius Henrique; Lima, Raphael Jonathas da Costa. Dinâmicas de poder na indústria automotiva: uma análise das políticas de eletrificação. Revista PPC – Políticas Públicas e Cidades, Curitiba, v. 14, p. 3-12, 2025.

BYD Brasil. Site oficial. [S. l.], 2025.

Cabral Neto, João Pinto. *Eletrificação veicular no Brasil: desafios e perspectivas.* 2021. 73 f., il.; 30 cm. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 26 jan, p. 18-21, 2021.

Callon, Michel. *Society in the making: the study of technology as a tool for sociological analysis.* In: Bijker, Wiebe; Hughes, Thomas P.; Pinch, Trevor (Org). *The social construction of technological systems: new directions in the sociology and history of technology.* Baskerville: MIT Press, p. 83-103, 1987.

Campos, N. L. Redes do agronegócio canavieiro: a territorialização do Grupo Tércio Wanderley no Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba – MG. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, p. 34-40, 2014.

Castillo, R. Dinâmicas recentes do setor sucroenergético no Brasil: competitividade regional e expansão para o bioma cerrado. *Geographia*, Niterói, Ano 17, n.35, p. 96-116, 2015.

Castilho, Denis. Dilemas e contradições da eletrificação no Brasil. In: ZAAR, Miriam H.; Vasconcelos P. Junior, Magno; CAPEL, Horacio (org.). *La electricidad y el*

territorio. Historia y futuro. Barcelona: Universidad de Barcelona / Geocrítica, p. 12-18, 2017.

Cavagliano, Laís. Análise da viabilidade técnica e econômica da substituição de veículos a combustão interna por veículos elétricos e veículos elétricos híbridos no Brasil. Repositório Institucional UNESP, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, p. 17-18, 2021.

Cavalheiro, Ellen M. B.; Oliveira, Washington A. de. Problemas de roteamento de veículos elétricos considerando a degradação da bateria. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, v. 11, n. 1, p. 1-2, 2025. Trabalho apresentado no XLIII CNMAC, Centro de Convenções do Armação Resort - Porto de Galinhas - PE, 2024.

Cesaris, Luis Enrique Urtubey de. Reconceitualizando o institucionalismo histórico: path dependence, agência e mudança. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciência Política) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 12-45, 95-105, 2009.

Climate Watch. Emissões de gases de efeito estufa por setor. 2022. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. Acesso em: 5 jul. 2025.

Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). Perfil do setor do Açúcar e do Álcool no Brasil, Brasília, Brasil, 2008.

CRW Engenharia. *Os primeiros carros eram elétricos?* Disponível em: <https://crwengenharia.com.br/os-primeiros-carros-eram-eletricos/>. Acesso em: 7 jul. 2025.

David, P. *Clio and the economics of QWERTY. American Economic Review Papers and Proceedings*, Princeton, New Jersey, v. 75, n. 2, p. 332-337, may 1985.

Delgado, G. C. Do capital financeiro na agricultura à economia do agronegócio: mudanças cíclicas em meio século (1965-2012). Porto Alegre: Editora da UFRGS. p. 13-20, 2012

Dosi, Giovanni. *Technological paradigms and technological trajectories*, p. 147-161, 1981.

Duguet, E. *Innovation height, spillovers and TFP growth at the firm level: evidence from French manufacturing. Economics of Innovation and Technology*, v. 15, p. 3-4, 2006.

Empresa De Pesquisa Energética (EPE). Poupa Terra. Rio de Janeiro: EPE, 2024.

Empresa De Pesquisa Energética (EPE). *Nota de Esclarecimentos: Combustível do Futuro.* Rio de Janeiro, 2025.

Empresa De Pesquisa Energética (EPE). *Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (BEN) 2024: ano base 2023.* Rio de Janeiro: EPE, 2024.

Embrapa. Séries históricas. Brasília, DF: Embrapa, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pre-producao/socioeconomia/estatisticas/series-historicas>.

Ferreira, João Vitor. BYD inicia montagem de carros elétricos e híbridos no Brasil. *Quatro Rodas*, São Paulo, 1 jul. 2025.

Fuentes, Patrick. Falta de incentivo à produção de carros elétricos pode isolar o Brasil do cenário mundial. Jornal da USP, 12 ago. 2021.

GWM Brasil. Media Center. [S. l.], 2025.

Hamatsu, Newton Kenji; Souza, Elias Ramos de. Transição energética, Nova Indústria Brasil e o papel do Ministério da Ciência e Tecnologia e da Finep. Princípios, São Paulo, v. 43, n. 170, p. 52–79, 2024.

Hoff, Debora Nayar. A história importa: proposta de estrutura analítica para o estudo de “path-dependence”. *Ensaio FEE*, Porto Alegre, v. 32, n. 1, p. 7-30, jun. 2011.

Ibama. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Programa de Controle de Emissões Veiculares – PROCONVE. 2022.

Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística – IBGE. Produção de cana-de-açúcar: valor da produção, quantidade produzida, mapas e séries históricas.

Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística – IBGE. AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS. Em 2023, pobreza no país cai ao menor nível desde 2012. Agência de Notícias IBGE, [s. l.], 28 maio 2024.

Instituto Brasileiro De Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP). Maiores consumidores de petróleo e LGN em 2021 [online]. Rio de Janeiro: Observatório do Setor – área de Análise Econômica, 2021.

International Council on Clean Transportation (ICCT). China's New Energy Vehicle Industrial Development Plan for 2021 to 2035: ICCT Policy Update. Beijing; Berlin; San Francisco; São Paulo; Washington: ICCT, June 2021.

International Energy Agency. Global EV Outlook 2023: Accelerating ambitions despite the headwinds. [S.l.], 2023.

International Energy Agency (IEA). EV Life Cycle Assessment Calculator. *Data Tools*, 5 jun. 2024.

International Energy Agency (IEA). *Global EV Outlook 2022: Securing supplies for an electric future – Executive Summary*. Paris: IEA, 2022.

International Energy Agency. *New Energy Vehicle Industry Development Plan (2021–2035)*. Paris: IEA, 2021.

International Energy Agency. *IEA. Policies to promote electric vehicle deployment*, in: *Global EV Outlook 2021*. Paris: IEA, 2021.

Kemp, R., & Pearson, P. *Final report of the MEI project measuring eco innovation*. UM Merit, p. 4-11, 2007.

Lara, Daniela Mueller de; Richter, Marc François. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. Novos Cadernos NAEA, Belém, v. 26, n. 1, p. 413–436, jan.–abr. 2023.

Li, Shanjun; ZHU, Xianglei; MA, Yiding; ZHANG, Fan; ZHOU, Hui. *The role of government in the market for electric vehicles: Evidence from China*. *Journal of Policy Analysis and Management*, v. 41, 2021.

M. Svampa: «‘Consenso de los Commodities’ y lenguajes de valoración en América Latina» en *Nueva Sociedad*, 2013.

Mahoney, James. *Path Dependence in Historical Sociology*. *Theory and Society* 29:4. Agosto, p. 507-526, 2000.

Mazzucato, Mariana. O Estado empreendedor: desmascarando o mito do setor público vs o setor privado. São Paulo: Portfolio/Penguin, p. 12-32, 136-140, 2014.

Mello, Fernando Homem de. O crescimento agrícola brasileiro dos anos 80 e as perspectivas para os anos 90. *Revista de Economia Política*, São Paulo, v. 10, n. 3, p. 1-9, 1990.

Mera, Zamir; Bieker, Georg; Rebouças, Ana Beatriz; Cieplinski, André. Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil, p. 3-27, 2023.

Ministério de Minas e Energia (MME). O Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel. 2006.

Milanez, Artur Yabe; Maia, Guilherme Baptista da Silva; Guimarães, Diego Duque; Ferreira, Cleiton Leandro Alves. Biodiesel e diesel verde no Brasil: panorama recente e perspectivas. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2022. BNDES Setorial, v. 28, n. 56, p. 46-50, 2022.

Monteiro, Sérgio R. Incentivos fiscais para elétricos nos EUA estão em risco. *Economizar Combustível*, 10 jul. 2024.

Moraes, Marcelo Lopes de; Bacchi, Mirian Rumenos Piedade. Etanol: do início às fases atuais de produção. *Ano XXIII*, n. 4, p. 5-19, out./nov./dez. 2014.

Mordor Intelligence. *China Electric Vehicle Charging Infrastructure* [relatório online].

Neves, Thais Juliane; Harder, Márcia Nalessio Costa. Diesel verde: a nova era dos biocombustíveis em uma revisão. *Bioenergia em Revista: Diálogos*, v. 11, n. 2, p. 91–112, jul./dez. 2021.

Nobre, M., Amazonas, M. de C. Desenvolvimento sustentável: a institucionalização de um conceito. Brasília: Edições Ibama, p. 21-59, 2002.

North, D. C. *Institutions, institutional change and economic performance*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 7-11, 92-139, 1990.

Oliveira, Gisela Marta; Vidal, Diogo Guedes; Maia, Rui Leandro; Estrada, Rui; Sousa, Manuel João Lemos de. O que significa descarbonizar? Uma visão da sociedade atual sem energia fóssil. In: Araújo, Emilia; Silva, Márcia; Ribeiro, Rita (Org.). Sustentabilidade e descarbonização: desafios práticos. Braga: CECS, p. 9-27, 2020.

Pereira, M. F. V. Agronegócio e urbanização no Triângulo Mineiro: As “cidades da cana” e as especificidades do urbano sob o efeito do setor sucroenergético. Ateliê Geográfico, Goiânia-GO, v. 16, n. 1, p. 185-203, abr./2022,

PricewaterhouseCoopers (PwC) Brasil Consultoria LTDA. Carros elétricos representarão 14 % da demanda energética do Brasil em 2040. São Paulo, 2 mar. 2023.

Quatro Rodas. [S. l.], 2025.

Raízen. Raízen inaugura maior planta de Etanol de Segunda Geração do mundo. Sala de Imprensa, São Paulo, 24 de maio de 2024.

Reis, Guilherme Azevedo de Sá; Ferretti, Amanda Soares Zambelli. Veículos elétricos no Brasil: benefícios, desafios e perspectivas de impacto socioambiental. Revista Competitividade e Sustentabilidade, Uberlândia, v. 11, n. 1, p. 21–36, 2024.

Reis, Silvio Rodrigo dos; Silva, Elaine Aparecida da. Motores Elétricos Flex a Etanol: uma nova era no setor automotivo mundial. Revista de Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 12, n. 12, p. 45-48, 2017.

Renewable Fuels Association (RFA). Annual ethanol production. Markets and Statistics. 2024.

Ribeiro, Magno Silva dos Santos. O papel da coerência regulatória para o desenvolvimento de uma infraestrutura de recarga de veículos elétricos no Brasil. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (MBA em Governança e Controle da Regulação) – Escola Nacional de Administração Pública, Brasília, DF, p. 6-10, 2024.

Rossoni, Renata Luiza de C.; Leite, Diogo Barbosa; Gonçalves, Renata Benigna; Ogasavara, Mario Henrique. Expansão internacional sustentável: os caminhos da Raízen para a liderança verde. *Revista de Administração Contemporânea*, v. 29, n. 1, p. 1-14, 2025.

Rovai, Fernando Fusco. Estudo da descarbonização pela eletrificação de veículos leves. 2024. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos), p. 52-87, 2024.

Santos, A. O. et al. Impactos socioambientais decorrentes da nova geração de baterias aplicadas em carros elétricos. REDE – Revista Eletrônica Direito e Engenharias, v. 4, p. 42-53, 2020.

Shikida, P. F. A. A evolução diferenciada da agroindústria canavieira no Brasil de 1975 a 1995. Piracicaba (SP), p. 68-92, 1997. Tese - Economia Aplicada, ESALQ/USP

Shikida, Pery Francisco Assis; Perosa, Bruno Benzaquen. Álcool Combustível no Brasil e Path Dependence. Revista de Estudos Regionais e Urbanos (Online), v. 50, n. 2, p. 243-259, abr./jun. 2012.

Schumpeter, J. A. (1982). Teoria do desenvolvimento econômico. São Paulo: Abril Cultural, p. 94-135, 1982.

Távora, Fernando Lagares. História e economia dos biocombustíveis no Brasil. Textos para Discussão, n. 89, Brasília: Senado Federal, Consultoria Legislativa, p. 13-65, 2011.

Tigre P. Gestão da Inovação. Ed. Campus, p. 73-75, 78-80, 87-88, 101-103, 2006.

Toyota Brasil. Manuais e etiquetas. [S. l.], 2025.

União da Indústria de Cana-de-açúcar – UNICA (2008). Relatório de Sustentabilidade 2008.

Wolffenbuttel, Rodrigo Foresta. Políticas setoriais e inovação: entraves e incentivos ao automóvel elétrico no Brasil. Revista Brasileira de Inovação, Campinas, v. 21, p. 3-28, 2022.

Yara Brasil. Quem são os maiores produtores de cana-de-açúcar? *Blog YaraNutre*, Yara Brasil, 20 jul. 2023.

Zhou, Jiaming; RONG, Jianfei; Zhang, Jinming; Liu, Chunrui; Yi, Fengyan; Jiao, Zhipeng; Zhang, Caizhi. *Deep learning estimation of state of health for lithium-ion batteries using multi-level fusion features of discharge curves*. Journal of Power Sources, v. 653, 2025.