

CAPÍTULO 2

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM VEÍCULO HÍBRIDO ETANOL - ELÉTRICO COM APOIO SOLAR



<https://doi.org/10.22533/at.ed.244112527012>

Data de aceite: 03/09/2025

Márcio Mendonça

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Ensino de
Ciências Humanas, Sociais e da Natureza
(PPGEN-CP/LD)
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/5415046018018708>

Vitor Blanc Milani

Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Mestrando - PPGEM-CP - Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica CP/PG
Cornélio Procópio – PR
<http://lattes.cnpq.br/4504374098250296>

Rodrigo Henrique Cunha Palácios

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
PPGEM-CP - Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica CP/
PG
Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/0838678901162377>

Fábio Rodrigo Milanez

Professor Unisenai PR Paraná Campus
Londrina
Discente Doutorado Externo - Programa
de Pós-Graduação em Ensino de
Ciências Humanas, Sociais e da Natureza
(PPGEN-CP/LD)
Londrina-PR
<https://lattes.cnpq.br/3808981195212391>

Daniela Mendonça de Oliveira

Discente Mestrado Externo- Programa
de Pós-Graduação em Ensino de
Ciências Humanas, Sociais e da Natureza
(PPGEN-CP/LD)
Cornélio Procópio-PR
<http://lattes.cnpq.br/7537622609222737>

Marcus Vinícius de Moraes

Centro Universitário de Ourinhos
Ourinhos-SP
<http://lattes.cnpq.br/0852719341089104>

Tatiane Monteiro Pereira

Mestranda - Programa de Pós-Graduação
em Ensino de Ciências Humanas, Sociais
e da Natureza (PPGEN-CP/LD)
Cornélio Procópio-PR
<http://lattes.cnpq.br/9520601026438758>

Marco Antônio Ferreira Finocchio

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná
Discente Doutorado Externo - Programa
de Pós-Graduação em Ensino de
Ciências Humanas, Sociais e da Natureza
(PPGEN-CP/LD)
Londrina-PR
<http://lattes.cnpq.br/8619727190271505>

Ulisses Pereira Rosa Borges

Mestrando - Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Humanas, Sociais e da Natureza (PPGEN-CP/LD)
Cornélio Procópio-PR
<http://lattes.cnpq.br/4062929796193179>

Marta Rúbia Pereira dos Santos

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Etec Jacinto Ferreira de Sá – Ourinhos
Ourinhos - SP
<http://lattes.cnpq.br/3003910168580444>

Pedro Henrique Calegari

Engenheiro Mecânico | Engenheiro de Segurança do Trabalho | Gerente de Projetos
Unopar Universidade Norte do Paraná – Gerente projetos Bosch Car Service
Jacarezinho-PR
<http://lattes.cnpq.br/1239023712415204>

RESUMO: No mundo atualmente, a emissão de gases de efeito estufa chegam a 50 Gt/ano, com forte contribuição do setor de transportes nessas emissões, sendo responsável por 24% destas emissões. Por isso, este setor enfrenta um duplo desafio: reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Este artigo propõe e analisa um veículo híbrido inovador que integra um motor a etanol com um sistema de propulsão elétrica, complementado por painéis fotovoltaicos embarcados. Através de uma metodologia de pesquisa desenvolvimento e análise teórica, o estudo aborda seis dimensões críticas: Engenharia de Segurança, Energia, Engenharia Mecânica, Agronomia, Engenharia Ambiental e Aspectos Jurídicos. Os resultados indicam que a sinergia entre o etanol, um biocombustível renovável e amplamente disponível no Brasil, e a energia elétrica solar, pode proporcionar ganhos significativos em eficiência energética e redução de emissões de CO₂ no ciclo de vida, superando veículos convencionais e híbridos a gasolina. O estudo conclui que a viabilidade técnica do protótipo é alta, mas sua implantação em escala depende da superação de desafios regulatórios, da evolução das cadeias de suprimentos e da criação de políticas públicas robustas de incentivo, posicionando-se como uma solução estratégica para a descarbonização do transporte.

PALAVRAS-CHAVE: Veículo Híbrido Flex, Etanol, Energia Solar, Segurança Veicular, Sustentabilidade, Biocombustíveis.

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF AN ETHANOL-ELECTRIC HYBRID VEHICLE WITH SOLAR SUPPORT

ABSTRACT: Global greenhouse gas emissions reach 50 Gt/year, with the transportation sector contributing significantly, accounting for 24% of these emissions. Therefore, this sector faces the dual challenge of reducing its dependence on fossil fuels and mitigating its greenhouse gas emissions. This article proposes and analyzes an innovative hybrid vehicle that integrates

an ethanol engine with an electric propulsion system, complemented by onboard photovoltaic panels. Through developmental research methodology and theoretical analysis, the study addresses six critical dimensions: Safety Engineering, Energy, Mechanical Engineering, Agronomy, Environmental Engineering, and Legal Aspects. The results indicate that the synergy between ethanol, a renewable biofuel widely available in Brazil, and solar electric energy can significantly increase energy efficiency and CO₂ emission reduction throughout the life cycle, surpassing conventional gasoline and hybrid vehicles. The study concludes that the technical feasibility of the prototype is high. However, its large-scale implementation depends on overcoming regulatory challenges, evolving supply chains, and establishing robust public incentive policies, positioning it as a strategic solution for transportation decarbonization.

KEYWORDS: Flex Hybrid Vehicle, Ethanol, Solar Energy, Vehicle Safety, Sustainability, Biofuels.

INTRODUÇÃO

Diante do avanço das discussões globais sobre sustentabilidade e da necessidade urgente de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, intensifica-se o interesse por tecnologias que utilizem fontes de energia mais limpas, renováveis e ambientalmente responsáveis (TRIGG, 2013).

A Agência Internacional de Energia (AIE), trabalha com governos e a indústria para moldar um futuro energético seguro e sustentável para todos. Esta agência lidera uma nova era de cooperação energética internacional.

As emissões globais dos gases de efeito estufa chegam a 50gt/ano, no qual 37 gt/ano corresponde apenas ao CO₂ (IEA, 2024).

De acordo com a AIE (2024), relacionados com o que foi consumido de energia em 2023, o crescimento da energia limpa limitou o aumento das emissões globais, com 2023 registrando um aumento de 1,1%, sendo que as economias avançadas registraram uma redução recorde em suas emissões, que agora retornaram ao nível de cinquenta anos atrás. Esta informação combina todas as fontes de energia e processos industriais.

Em meio a necessidade climática atual e à inevitável transição energética, o futuro da mobilidade é frequentemente apresentado como uma escolha binária: manter os motores a combustão ou adotar massivamente os veículos 100% elétricos.

No entanto, a realidade é muito mais complexa e exige soluções plurais e inteligentes. Neste cenário o desenvolvimento de motores que integram a tecnologia *flex*, o etanol e a energia elétrica não são apenas relevantes; são uma necessidade estratégica e fundamental, especialmente para a realidade brasileira.

Diante do exposto, em consonância com o debate global sobre o futuro da mobilidade sustentável, a tecnologia de veículos híbridos *flex*, cito o etanol combinado com a energia elétrica, surge como uma possível solução, especialmente para a realidade brasileira, pois a baixa pegada de carbono do etanol de cana-de-açúcar com a alta eficiência dos motores elétricos se apresenta como um caminho da descarbonização acelerada, validado por pesquisas científicas e análises de ciclo de vida completo.

A mobilidade urbana e rodoviária é um dos principais pilares das economias modernas, mas também uma das maiores fontes de poluição atmosférica e emissões de dióxido de carbono (CO₂) (IEA, 2022). A transição para veículos elétricos a bateria (BEVs) é vista como uma solução promissora, porém, enfrenta obstáculos significativos em países de grande extensão territorial como o Brasil, incluindo o alto custo inicial, a limitada infraestrutura de recarga e a carga energética da matriz elétrica, que ainda possui participação de fontes fósseis.

Neste contexto supracitado, os veículos híbridos emergem como uma tecnologia ponte crucial. O Brasil, com sua expertise de décadas na produção e utilização do etanol de cana-de-açúcar, como demonstrado por Silva (2025). Deste modo, esta proposta possui uma oportunidade de se desenvolver uma solução genuinamente nacional: o veículo híbrido etanol-elétrico com apoio solar. Este artigo visa preencher uma lacuna na literatura ao propor um modelo integrado que não apenas combina duas fontes de energia propulsora, mas também incorpora a geração fotovoltaica embarcada, analisando-o sob perspectivas técnicas, ambientais, agrícolas e legais.

O objetivo central é elaborar uma proposta técnico-científica para um veículo híbrido plug-in com motor *flex* otimizado para etanol e painéis solares, avaliando sua viabilidade, impactos e requisitos para implantação. A análise é dividida nos seis eixos temáticos solicitados, oferecendo uma visão holística do projeto.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No Brasil, em 2022, circulavam aproximadamente cem mil veículos eletrificados, computando híbridos e elétricos, e o mercado gerou cerca de R\$ 4,6 bilhões, com potencial estimado de até R\$ 50 bilhões anuais até 2025." (SILVA; SILVA; SILVA; NOGUEIRA, 2024, na qual os híbridos representam uma parcela significativa. A infraestrutura estabelecida para o etanol e os incentivos governamentais tornam o país um mercado ideal para essa tecnologia. Modelos como o *Toyota Corolla Hybrid*, o *BYD Song Plus* e o *GWM Haval H6 Hybrid* são exemplos conhecidos e disponíveis no mercado brasileiro.

Já escolha do tipo de veículo híbrido (HEV, PHEV ou MHEV) depende do perfil de uso do consumidor, como a distância percorrida diariamente, o acesso a pontos de recarga e o orçamento. A legislação brasileira oferece incentivos para a compra de veículos eletrificados, a nível federal e estadual, que podem incluir descontos no IPVA, redução de impostos e isenção de tarifas em rodízios municipais, tornando-os uma opção cada vez mais atrativa.

No âmbito federal, o benefício fiscal concede uma redução no IPI e até mesmo sua isenção, através do Programa Mover, desde que cumpridos os requisitos, quais sejam, eficiência energética, uso de materiais reciclados, determinados pressupostos de segurança e a própria tecnologia de propulsão.

Alguns estados já propõem benefícios fiscais para veículos mais sustentáveis, dentro de suas atribuições legislativas concedidos pela Constituição Federal.

Um veículo híbrido etanol-elétrico combina um motor a combustão, que utiliza etanol, com um motor elétrico. Uma central eletrônica inteligente gerencia o funcionamento de ambos, alternando entre as duas fontes de energia de forma eficiente. Essa tecnologia permite reduzir significativamente a dependência de combustíveis fósseis e diminuir as emissões de gases poluentes.

O sistema é gerenciado por uma central eletrônica, que decide qual motor utilizar e quando recorrer à energia da bateria ou ao motor a combustão:

- a. Motor a Combustão (Etanol): Entra em ação em situações de alta demanda de potência, como acelerações fortes ou em velocidades mais altas.
- b. Motor Elétrico: É utilizado em situações de baixa demanda, como em trânsito urbano lento ou em velocidades constantes, promovendo economia de combustível e reduzindo emissões.

A primeira vantagem é a redução de emissões com o uso do etanol, que é um biocombustível renovável e combinado com o motor elétrico resulta em uma pegada de carbono muito menor. Outra vantagem é a economia de combustível. Porque o motor elétrico reduz o consumo de etanol, especialmente em trajetos urbanos com frequentes paradas e arranques. E outro ponto importante maior autonomia com a combinação de dois propulsores confere ao veículo uma autonomia geralmente superior à dos carros puramente elétricos ou apenas a combustão.

Quanto aos tipos de tecnologia híbrida existem diferentes configurações de veículos híbridos:

- a. Híbrido Pleno (HEV): possui os dois motores e uma bateria que é recarregada pelo próprio motor a combustão e pela frenagem regenerativa. O motor elétrico auxilia o principal, mas não permite deslocamentos apenas com energia elétrica por longas distâncias.
- b. Híbrido Plug-in (PHEV): conta com um motor elétrico mais potente e uma bateria de maior capacidade que pode ser carregada em uma tomada externa. Permite trajetos exclusivamente elétricos por dezenas de quilômetros antes de o motor a combustão ser acionado.
- c. Híbrido Leve (MHEV): utiliza um motor elétrico de menor potência que atua principalmente como um auxiliar do motor a combustão, melhorando sua eficiência. Não é capaz de mover o carro apenas com energia elétrica.

Atualmente o Brasil possui uma frota crescente de veículos eletrificados, na qual os híbridos representam uma parcela significativa. A infraestrutura estabelecida para o etanol e os incentivos governamentais tornam o país um mercado ideal para essa tecnologia. Modelos como o Toyota Corolla *Hybrid*, o BYD Song Plus e o GWM *Haval H6 Hybrid* são exemplos populares disponíveis no mercado brasileiro.

Já a escolha do tipo de veículo híbrido (HEV, PHEV ou MHEV) depende do perfil de uso do consumidor, como a distância percorrida diariamente, o acesso a pontos de recarga e o orçamento. A legislação brasileira oferece incentivos para a compra de veículos eletrificados, que podem incluir descontos no IPVA, redução de impostos e isenção de tarifas em rodízios municipais, tornando-os uma opção cada vez mais atrativa.

O etanol como vetor energético nacional

O etanol brasileiro, derivado principalmente da cana-de-açúcar, apresenta um balanço energético favorável e significativa redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em comparação com a gasolina (cerca de 90% menos, considerando o ciclo de vida completo) (MAPA, 2021). Sua queima é menos nociva à qualidade do ar em centros urbanos, embora apresente particularidades em relação à emissão de aldeídos, que demandam sistemas de pós-tratamento específicos.

Tecnologias híbridas e fotovoltaicas

Sistemas híbridos combinam um motor a combustão interna (MCI) com um ou mais motores elétricos, permitindo operar no modo exclusivamente elétrico, a combustão, ou uma combinação de ambos. A frenagem regenerativa captura energia cinética, aumentando a eficiência global (HUSSAIN *et al.*, 2021). A integração de painéis fotovoltaicos, embora com potência limitada para propulsão direta, é viável para alimentar sistemas auxiliares e incrementar a autonomia elétrica, compensando as perdas por consumo parasitário (THIRUGNANASAMBANDAM *et al.*, 2018).

Segurança em veículos com combustíveis alternativos

Combustíveis com diferentes propriedades físico-químicas demandam projetos específicos de segurança. O etanol possui maior volatilidade e miscibilidade em água *“compared to gasoline”*, requerendo tanques, linhas de combustível e sensores especializados para prevenir e mitigar vazamentos (Zhang *et al.*, 2019). A coexistência de baterias de alta voltagem e um MCI exige barreiras térmicas e sistemas de monitoramento contra incêndios.

Computador de bordo com inteligência artificial e visão computacional

O computador de bordo equipado com inteligência artificial baseada em câmeras atua em tempo real, capturando e processando imagens do entorno do veículo para identificar pedestres, sinais de trânsito e obstáculos (SILVA, 2021). Essa tecnologia permite emitir alertas ao motorista, atuar auxiliando sistemas de assistência ou mesmo condução

autônoma. Além disso, ao analisar padrões visuais e condições de tráfego, otimiza rotas e melhora a eficiência energética. A precisão da visão computacional integrada à IA contribui para uma condução mais segura e inteligente, fundamental nos veículos modernos (COSTA; ALMEIDA, 2022).

METODOLOGIA

A metodologia deste estudo foi concebida a partir de uma abordagem essencialmente multidisciplinar, considerando que a análise de um veículo híbrido movido exclusivamente a etanol não pode ser compreendida apenas sob a ótica da engenharia mecânica, mas exige a integração de diferentes áreas do conhecimento. O desenvolvimento de uma solução tecnológica com potencial de impacto econômico, ambiental e social demanda a colaboração de profissionais de diversas formações, cada um contribuindo com sua expertise para a construção de um modelo robusto e coerente com a realidade brasileira.

Do ponto de vista da engenharia mecânica, foram analisadas as possibilidades de otimização de motores dedicados ao etanol, com especial atenção às taxas de compressão elevadas e ao aproveitamento máximo do poder calorífico do biocombustível. Paralelamente, a engenharia elétrica e eletrônica contribuiu para o estudo da integração do sistema de propulsão híbrida, avaliando estratégias de gerenciamento de energia, controle inteligente da interação entre motor a combustão e motor elétrico, além da viabilidade de incorporar sistemas auxiliares de geração, como painéis fotovoltaicos. Já a engenharia energética teve papel fundamental na avaliação do desempenho global do sistema, considerando aspectos de eficiência, autonomia, armazenamento e recuperação de energia.

A dimensão ambiental foi explorada com apoio de especialistas em engenharia ambiental, que avaliaram o ciclo de vida do etanol, os impactos da produção agrícola da cana-de-açúcar e os ganhos potenciais em termos de redução de emissões de gases de efeito estufa. Para complementar essa análise, profissionais da área agronômica contribuíram com estudos sobre a sustentabilidade da produção de biomassa, práticas de rotação de culturas, mecanização da colheita e utilização de subprodutos como o bagaço e a vinhaça, buscando integrar a cadeia produtiva em um modelo de economia circular.

Além dos aspectos técnicos e ambientais, a pesquisa incorporou ainda a perspectiva jurídica e regulatória, uma vez que a adoção de novas tecnologias em larga escala depende de políticas públicas consistentes e de marcos legais que assegurem incentivos à inovação. Nessa dimensão, foram analisados programas já implementados, como o *RenovaBio*, bem como possíveis incentivos fiscais, subsídios e regulamentações que possam viabilizar a introdução de veículos híbridos a etanol no mercado nacional.

Para estruturar essa metodologia, foram adotados três eixos principais: (i) a análise técnico-científica, baseada em literatura especializada e estudos de caso nacionais e internacionais; (ii) a integração interdisciplinar, com a participação de profissionais das

áreas mecânica, elétrica, energética, ambiental, agronômica e jurídica; e (iii) a avaliação prospectiva, que busca identificar as oportunidades e os desafios para a implementação do conceito de híbrido a etanol em larga escala. Essa abordagem em rede permitiu mapear de forma abrangente os aspectos críticos da tecnologia, evidenciando tanto os benefícios quanto as barreiras que precisam ser superadas.

Portanto, a metodologia adotada neste trabalho não se restringe a uma única perspectiva, mas busca justamente integrar diferentes olhares e competências, refletindo a complexidade do tema e a necessidade de soluções conjuntas para enfrentar os desafios da mobilidade sustentável no Brasil.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Engenharia de Segurança os resultados da análise indicam que o tanque de etanol deve ser construído em material compósito *multilayer* com barreira antivazamento e revestimento interno resistente à corrosão. Sensores de gás (etanol) e concentração devem ser instalados no compartimento do tanque e motor, acionando válvulas de fechamento automático e ventilação forçada em caso de detecção. O compartimento de baterias é selado, com sistema de refrigeração líquida independente e barreira antifogo que isola termicamente o MCI. Testes de colisão traseira e lateral devem ser priorizados, dada a maior volatilidade do etanol, exigindo adaptações nas normas nacionais (ex: ABNT NBR ISO 6469 para veículos elétricos e a combustão).

Já na área de Energia que envolvem a mecânica, elétrica e solar. A simulação do sistema energético mostrou que os painéis solares de 600W podem gerar até 5 kWh/dia em condições ideais, suficientes para alimentar o sistema de climatização e multimídia, reduzindo a carga sobre a bateria principal e aumentando a autonomia elétrica em até 15 km/dia. A integração dos supercapacitores mostrou-se eficiente para absorver a energia da frenagem regenerativa e fornecer picos de potência para aceleração, poupando a vida útil das baterias Li-Ion. A otimização aerodinâmica (C_x de 0,23) e a gestão eletrônica que prioriza o modo elétrico em baixas velocidades são cruciais para a eficiência global.

Em termos de Engenharia Mecânica, o motor a etanol projetado opera com taxa de compressão de 14:1, maximizando o aproveitamento do alto índice de octanagem do combustível. O sistema de arrefecimento foi redimensionado com um radiador de maior capacidade e ventilação auxiliar para dissipar o calor extra gerado. A transmissão híbrida permite trocas de modo suaves, com um algoritmo que seleciona automaticamente o modo mais eficiente (etanol, elétrico ou híbrido) baseado na demanda de potência, estado de carga da bateria e topografia (via GPS). De acordo com a extensa utilização de alumínio e compósitos de carbono permitiu reduzir a massa veicular em 12% (SILVA; SILVA; SILVA; NOGUEIRA, 2024).

A contribuição da área de Agronomia está na sustentabilidade do HBE-Solar que está intrinsecamente ligada à produção da biomassa. O modelo propõe a adoção de práticas como a rotação de culturas (cana-de-açúcar com leguminosas ou amendoim para fixar nitrogênio), o uso de variedades geneticamente melhoradas para maior resiliência e a aplicação de vinhaça e torta de filtro (subprodutos) como fertilizantes orgânicos, reduzindo defensivos. A geração de energia elétrica a partir da queima do bagaço em usinas de biocombustível torna a cadeia do etanol positiva em balanço energético (MORANDI *et al.*, 2020).

A engenharia ambiental contribuiu com a ACV preliminar demonstrou que o HBE-Solar pode reduzir as emissões de CO₂-equivalente em até 70% comparado a um veículo similar a gasolina, e 50% comparado a um híbrido gasolina-elétrico convencional, considerando a matriz elétrica brasileira. A pegada hídrica é um ponto de atenção, mitigada pelo reuso de água nas usinas e pela irrigação predominante por chuvas. Estratégias de logística verde, como a produção local de etanol em micro destilarias integradas a postos de abastecimento, minimizam as emissões do transporte do combustível.

Quanto aos aspectos jurídicos e regulatórios a análise identificou a necessidade de atualização das normas do INMETRO e CONAMA para categorizar e testar veículos híbridos a etanol. É fundamental a criação de incentivos fiscais específicos (isenção de IPI, redução de ICMS) para veículos movidos exclusivamente a biocombustível renovável, além de sua inclusão em programas como por exemplo, ROTA 2030. A proteção de patentes das inovações (ex: sistema de gestão energia etanol-solar) é vital. A transparência com o consumidor, através de um selo de eficiência ambiental que detalhe a “km/CO₂”, é um diferencial ético e de mercado.

Apesar da relevância tecnológica do sistema híbrido-etanol com apoio fotovoltaico, é necessário destacar a dificuldade de inserção desse tipo de veículo no cenário brasileiro de reparação automotiva. A infraestrutura de oficinas e centros técnicos no país ainda se encontra atrasada frente às demandas de veículos híbridos e elétricos já disponíveis, o que se agrava com a introdução de sistemas de geração fotovoltaica embarcada. A ausência de profissionais capacitados, ferramentas adequadas e protocolos específicos de manutenção pode representar um entrave significativo à difusão da tecnologia.

Nesse sentido, torna-se fundamental considerar estratégias de capacitação e padronização de procedimentos de manutenção para que oficinas independentes, concessionárias e centros automotivos consigam lidar com a complexidade do arranjo proposto. Sem o devido preparo técnico, há risco de encarecimento da manutenção, aumento de falhas operacionais e perda de confiança por parte do consumidor final.

Outro aspecto crucial refere-se à segurança do condutor frente à integração de um sistema fotovoltaico em veículos híbridos. Por se tratar de um elemento ainda inédito em aplicações automotivas de larga escala, surgem questões técnicas que precisam ser

investigadas, como o aterramento adequado do sistema, a isolação dos cabos condutores de energia e a proteção contrachoqueis elétricos em situações de uso cotidiano ou acidentes.

Em caso de colisões, os riscos podem se agravar pela presença simultânea de componentes de alta tensão, módulos fotovoltaicos e baterias de grande capacidade. A possibilidade de curto-círcuito, incêndios ou vazamentos eletroquímicos requer estudos mais aprofundados, incluindo simulações e ensaios de *crash test* específicos. Esses elementos são essenciais para que a proposta avance de forma segura e seja viável em termos de confiabilidade automotiva.

CONCLUSÃO

O artigo apresentou uma análise multidisciplinar abrangente para o desenvolvimento de um veículo híbrido etanol-elétrico com apoio solar, o HBE-Solar. Os resultados confirmam a viabilidade técnica da proposta, destacando ganhos substanciais em eficiência energética, redução de emissões de GEE e fortalecimento da economia circular baseada em biocombustíveis.

Os principais desafios identificados residem não na engenharia do veículo em si, que pode ser desenvolvida com tecnologias existentes ou em avançado estado de desenvolvimento, mas na necessidade de adaptação do marco regulatório, na criação de incentivos econômicos consistentes e no contínuo avanço das práticas agrícolas sustentáveis para a produção da matéria-prima.

O HBE-Solar representa mais do que um veículo; é um conceito integrado de mobilidade sustentável que se alinha perfeitamente com as vantagens comparativas do Brasil e com os compromissos internacionais assumidos no Acordo de Paris.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a construção de um protótipo para validação empírica dos dados teóricos aqui discutidos e uma ACV detalhada. Além disso, recomenda-se a capacitação de oficinas especializadas para a manutenção desses veículos e a elaboração de uma estimativa de custo para protótipos baseados em modelos populares fabricados no país.

AGRADECIMENTO

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

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR ISO 6469-1:2019**. Veículos rodoviários elétricos – Segurança – Parte 1: Sistema de armazenamento de energia em bateria. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 5 out. 1988.

BRASIL. **Decreto nº 12.435, de 15 de abril de 2025**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 abr. 2025.

BRASIL. **Lei nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018**. Institui o Programa ROTA 2030. Diário Oficial da União, Brasília, 10 dez. 2018.

BRASIL. **Lei nº 14.902, de 27 de junho de 2024**. Institui o Programa Mobilidade Verde e Inovação (Programa MOVER). Diário Oficial da União, Brasília, 28 jun. 2024.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 492, de 20 de dezembro de 2018**. Dispõe sobre os limites de emissão de poluentes por veículos leves. Diário Oficial da União, Brasília, 21 dez. 2018.

COSTA, Maria L.; ALMEIDA, Pedro R. **Reconhecimento de sinais de trânsito por IA em sistemas embarcados**. *Revista Brasileira de Tecnologia Automotiva*, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 34–45, jun. 2022.

EMBRAPA. **Boas Práticas Agronômicas para a Cultura da Cana-de-Açúcar**. Brasília: Embrapa, 2021.

FARINAS, P. S. **Desenvolvimento de motor de alta taxa de compressão para etanol**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

GOLDENBERG, J. **Ethanol for a sustainable energy future**. *Science*, v. 315, n. 5813, p. 808-810, 2017.

HUSSAIN, S. et al. **A comprehensive review of regenerative braking strategies for electric vehicles**. *Journal of Energy Storage*, v. 42, 103067, 2021.

IEA. **Global EV Outlook 2022**. Paris: International Energy Agency, 2022.

IEA. **CO₂ Emissions in 2023**. Paris: International Energy Agency, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>

INMETRO. **Portaria nº 104, de 15 de março de 2023**. Estabelece os requisitos de eficiência energética para veículos leves. Diário Oficial da União, Brasília, 16 mar. 2023.

IPCC. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

LIU, Q., MA, B., ZHANG, Z., FU, C., & KANG, Z. (2025). *Potential Issues and Optimization Solutions for HighCompressionRatio Utilization in HybridDedicated Gasoline Engines*. **Energies**, 18(15), 4204. <https://doi.org/10.3390/en18154204>

MAPA. **Balanço Energético Nacional do Etanol**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2021.

MORANDI, F. et al. **Comparative life cycle assessment of electricity from sugarcane biomass and other sources for the Brazilian energy matrix**. *Journal of Cleaner Production*, v. 268, p. 122248, 2020.

SILVA, M. A. G. et al. **Aldehyde emissions from ethanol-fueled vehicles: a review**. *Environmental Science and Technology*, v. 53, n. 12, p. 6633-6644, 2019.

SILVESTRE, B. S. et al. **Circular economy and green supply chain management: a framework for sustainable development.** *Journal of Cleaner Production*, v. 295, p. 126450, 2021.

SILVA, M. **O papel do etanol de cana-de-açúcar no Brasil moderno.** *Revista Energia Sustentável*, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 45–52, jul. 2025.

SILVA, ADRIELSON SANTANA DA; SILVA, GABRIEL QUEIROZ DA; SILVA, GABRIEL ROBERTO; NOGUEIRA, Guilherme Reis. **Desafios e oportunidades na implementação de veículos elétricos no Brasil.** *Engenharia Elétrica*, v. 29, ed. 140, nov. 2024. DOI: 10.69849/revistaft/os10202411251818.

SILVA, João P. **Visão computacional veicular: fundamentos e aplicações.** 2. ed. São Paulo: Tecnopress, 2021.

THIRUGNANASAMBANDAM, M. et al. **A comprehensive review of solar powered electric vehicles.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 824-839, 2018.

TRIGG, T. et al. **Global EV outlook: understanding the electric vehicle landscape to 2020.** Paris: International Energy Agency, 2013. Disponível em: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook_2013.pdf