

IMPACTOS AMBIENTAIS DOS EFUELS E SUA COMPARAÇÃO COM VEÍCULOS ELÉTRICOS: EVIDÊNCIAS A PARTIR DO PROJETO HARU ONI

ENVIRONMENTAL IMPACTS OF EFUELS AND THEIR COMPARISON WITH ELECTRIC VEHICLES: EVIDENCE FROM THE HARU ONI PROJECT

IMPACTOS AMBIENTALES DE LOS EFUELS Y SU COMPARACIÓN CON LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS: EVIDENCIAS A PARTIR DEL PROYECTO HARU ONI

Fernando Henrique Madureira¹
Eduardo Miguel Prata Madureira²

RESUMO: A transição energética global demanda tecnologias capazes de reduzir as emissões de gases de efeito estufa sem comprometer a segurança energética e a mobilidade. Nesse contexto, os combustíveis sintéticos renováveis (eFuels) surgem como uma alternativa promissora para a descarbonização do setor de transportes, especialmente em segmentos cuja eletrificação apresenta limitações técnicas. Este estudo teve como objetivo analisar os impactos ambientais dos eFuels e compará-los aos veículos elétricos, utilizando como referência o Projeto Haru Oni, desenvolvido no Chile. A pesquisa caracteriza-se como exploratória, de natureza bibliográfica e documental, fundamentada na análise crítica de artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais nacionais e internacionais. Os resultados evidenciam que os eFuels apresentam potencial para reduzir as emissões líquidas de dióxido de carbono quando produzidos a partir de hidrogênio verde e carbono capturado da atmosfera, além de permitirem o aproveitamento da infraestrutura existente de distribuição de combustíveis. Em contrapartida, verificou-se menor eficiência energética quando comparados aos veículos elétricos, que, por sua vez, enfrentam desafios relacionados à mineração de minerais críticos, produção e reciclagem de baterias. Conclui-se que ambas as tecnologias possuem vantagens e limitações e devem ser consideradas soluções complementares para a descarbonização do transporte, contribuindo para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável relacionados à energia limpa, ao consumo responsável e à ação climática.

Palavras-chave: eFuels. Veículos elétricos. Hidrogênio verde. Transição energética. Sustentabilidade ambiental.

ABSTRACT: The global energy transition requires technologies capable of reducing greenhouse gas emissions while maintaining energy security and transportation efficiency. In this context, renewable synthetic fuels (eFuels) have emerged as a promising alternative for decarbonizing the transportation sector, particularly in segments where direct electrification remains technically challenging. This study aimed to analyze the environmental impacts of eFuels and compare them with battery electric vehicles, using the Haru Oni Project in Chile as a reference. The research is characterized as an exploratory bibliographic and documentary study based on the critical analysis of scientific articles, technical reports, and institutional publications. The findings indicate that eFuels have significant potential to reduce net carbon dioxide emissions when produced from green hydrogen and carbon captured from the atmosphere, while also enabling the use of existing fuel distribution infrastructure. However, they exhibit lower overall energy efficiency than battery electric vehicles, which, in turn, face environmental challenges associated with critical mineral extraction, battery manufacturing, and end-of-life recycling. It is concluded that both technologies present advantages and limitations and should be regarded as

¹ Engenheiro Mecânico (Centro Universitário Assis Gurgacz – FAG). Aluno especial do Programa de Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura (UNIOESTE).

² Economista (UNIOESTE). Mestre em Desenvolvimento Regional e Agronegócio (UNIOESTE). Doutorando em Desenvolvimento Rural Sustentável (UNIOESTE). Professor do Centro Universitário Assis Gurgacz (FAG).

complementary solutions for transport decarbonization, contributing to the achievement of the Sustainable Development Goals related to clean energy, responsible consumption, and climate action.

Keywords: eFuels. Electric vehicles. Green hydrogen. Energy transition. Environmental sustainability.

RESUMEN: La transición energética mundial exige tecnologías capaces de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero sin comprometer la seguridad energética ni la movilidad. En este contexto, los combustibles sintéticos renovables (eFuels) se presentan como una alternativa prometedora para la descarbonización del sector del transporte, especialmente en aquellos segmentos donde la electrificación directa presenta limitaciones técnicas. El objetivo de este estudio fue analizar los impactos ambientales de los eFuels y compararlos con los vehículos eléctricos de batería, utilizando como referencia el Proyecto Haru Oni, desarrollado en Chile. La investigación es de carácter exploratorio, basada en revisión bibliográfica y documental, sustentada en el análisis crítico de artículos científicos, informes técnicos y documentos institucionales nacionales e internacionales. Los resultados muestran que los eFuels poseen un importante potencial para reducir las emisiones netas de dióxido de carbono cuando son producidos a partir de hidrógeno verde y carbono capturado de la atmósfera, además de permitir el aprovechamiento de la infraestructura existente para la distribución de combustibles. No obstante, presentan una menor eficiencia energética en comparación con los vehículos eléctricos, los cuales enfrentan desafíos relacionados con la extracción de minerales críticos, la fabricación de baterías y su reciclaje. Se concluye que ambas tecnologías poseen ventajas y limitaciones, por lo que deben considerarse soluciones complementarias para la descarbonización del transporte y para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con la energía limpia, el consumo responsable y la acción por el clima.

Palabras clave: eFuels. Vehículos eléctricos. Hidrógeno verde. Transición energética. Sostenibilidad ambiental.

I INTRODUÇÃO

2

A urgente transformação para uma matriz energética mundial mais sustentável é uma das prioridades do século XXI, motivada pela pressão crescente para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e combater as mudanças climáticas (IPCC, 2023; IEA, 2023a). Com isso, os combustíveis sintéticos, ou eFuels, surgem como uma alternativa estratégica que mantém a infraestrutura de transporte atual e diminui as emissões líquidas de carbono (IEA, 2023a). A crescente preocupação acerca das mudanças climáticas impulsiona governos e empresas a procurar fontes de energia que reduzam as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023), o setor de transportes responde por aproximadamente 15% das emissões globais de GEE e cerca de 23% das emissões de CO₂ ligadas à energia. Por isso, é imprescindível adotar soluções sustentáveis para atingir os objetivos do Acordo de Paris, assinado em 2015, que busca limitar o aquecimento global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais (IPCC, 2023).

A pesquisa busca comparar os impactos ambientais dos eFuels e dos veículos elétricos sob a perspectiva da sustentabilidade e do ciclo de vida. Apesar de a eletrificação da frota global ser considerada uma solução para a descarbonização do transporte, ela tem limitações

importantes. Entre esses desafios estão a escassez de minerais essenciais para as baterias, a complexa logística envolvida na produção e descarte, e a possibilidade de sobrecarregar as redes elétricas em uma eletrificação em larga escala (World Bank, 2020; IEA, 2023a).

O Projeto Haru Oni, que é liderado pela Porsche AG em colaboração com empresas como Siemens Energy e HIF Global, representa um passo significativo na produção de eFuels em nível industrial. Situado na Patagônia chilena, o projeto aproveita os ventos locais para produzir energia elétrica limpa, que é crucial para a fabricação de hidrogênio verde (Siemens Energy, 2022). O CO₂ é extraído de fontes biogênicas, com planos de incluir a captura direta do ar (DAC) para um ciclo de carbono mais fechado e emissões líquidas menores (BloombergNEF, 2023a).

Levando isso em conta, este trabalho procura responder à questão central: a eletrificação total da frota é realmente o caminho mais viável para a descarbonização global, ou os eFuels oferecem uma alternativa técnica e ambientalmente superior?

A pesquisa analisa as condições técnicas de produção, a escalabilidade e os efeitos ambientais dos eFuels, bem como suas consequências para a transição energética global.

2 METODOLOGIA

Quanto à abordagem, trata-se de pesquisa exploratória, fundamentada em revisão bibliográfica e documental, que é adequada quando se busca um conhecimento mais aprofundado sobre um assunto pouco estudado (Lakatos; Marconi, 2017). Tal escolha se justifica pela busca de reunir, contrastar e analisar informações provenientes de estudos científicos, relatórios técnicos e documentos de instituições, o que possibilita construir um panorama detalhado e bem fundamentado sobre os eFuels e sua viabilidade tecnológica (Prodanov; Freitas, 2013).

É crucial comparar eFuels com veículos elétricos para identificar qual alternativa apresenta maior viabilidade técnica e menor impacto ambiental em diferentes contextos energéticos e operacionais. Segundo o relatório da European Commission (2023), a eletrificação direta é a melhor opção para a eficiência dos veículos leves, enquanto os eFuels aparecem como uma solução estratégica para setores que não conseguem se eletrificar facilmente, como a aviação e o transporte rodoviário pesado de longa distância. A International Energy Agency (IEA, 2023a) também endossa essa perspectiva, sugerindo que ambas as tecnologias devem

existir lado a lado como alternativas que se complementam dentro de um conjunto global de soluções para a descarbonização.

Este trabalho tem como objetivo analisar os aspectos técnicos e ambientais dos eFuels, tendo como base o Projeto Haru Oni, que está sendo realizado pela Porsche AG, em parceria com a HIF Global, Siemens Energy, entre outras empresas

O eFuel foi escolhido como o principal objeto de estudo devido à sua proposta inovadora de sintetizar um combustível líquido a partir de CO₂ capturado do ar e hidrogênio verde obtido por meio da eletrólise da água, utilizando eletricidade de fontes renováveis. Com isso, os eFuels podem ser utilizados sem adaptações na infraestrutura de veículos e postos de abastecimento existentes (PwC Strategy&, 2022), o que dispensa alterações significativas em motores de combustão interna e em postos de combustível.

Ao contrário de alternativas de descarbonização, como a eletrificação completa do transporte rodoviário, os eFuels permitem uma redução das emissões sem elevar substancialmente a demanda global por eletricidade (IEA, 2023a). Isso previne crises energéticas que poderiam ocorrer durante uma transição em larga escala para veículos elétricos.

3.1 Procedimentos de coleta e análise de dados

A coleta de dados ocorreu através de pesquisa bibliográfica e documental, incluindo artigos científicos, relatórios técnicos, publicações de instituições e bases de dados especializadas, além de documentos de fabricantes e organizações do setor energético (Lakatos; Marconi, 2017). A pesquisa foi conduzida em bases como ScienceDirect, Scopus, Google Scholar e Web of Science, priorizando trabalhos recentes nas áreas de eFuels, transição energética e tecnologias sustentáveis.

Foram utilizados critérios de inclusão rigorosos para a seleção das fontes, de modo a garantir que as informações sejam confiáveis. Levou-se em conta publicações científicas dos últimos dez anos, relatórios técnicos de instituições de prestígio, como a International Energy Agency (IEA), a Comissão Europeia e as Nações Unidas (ONU), bem como dados de empresas que estão diretamente envolvidas na produção de eFuels, como Porsche AG e Siemens Energy. Fontes que não possuem suporte técnico ou científico foram removidas.

A interpretação dos dados foi realizada de forma qualitativa e comparativa, o que possibilitou uma compreensão detalhada das informações e a identificação de tendências, limitações e contribuições significativas sobre o tema em questão (Gil, 2019). Para organizar as

informações, seguimos a técnica de análise de conteúdo de Bardin (2016), que sugere que a categorização em eixos temáticos torna a interpretação mais sistemática. Esse levantamento permitiu mapear consensos entre os autores, desacordos conceituais e lacunas ainda abertas no campo de investigação, ajudando a edificar uma crítica consistente.

3.2 Restrições do estudo e razão metodológica

As limitações são características de pesquisas exploratórias e se devem ao fato de que a investigação se apoiou em revisão bibliográfica e documental. A qualidade das fontes consultadas é fundamental para que os resultados sejam válidos.

Uma grande limitação é que os eFuels ainda não foram consolidados tecnologicamente, estando em desenvolvimento industrial e validação científica, faltando estudos empíricos e dados de longo prazo (IEA, 2023a).

Também há informações oriundas de fabricantes e empresas que atuam na produção e na promoção comercial dos eFuels, como a Porsche AG e a HIF Global. Essa base de dados pode trazer vieses empresariais e afetar a neutralidade da informação (Porter, 1989).

Foram comparados os dados fornecidos por empresas com estudos acadêmicos e relatórios técnicos de instituições independentes, como a International Energy Agency (IEA) e a European Commission. Esse método aumentou a robustez da análise.

Outra limitação identificada é a falta de métricas padronizadas que permitam uma comparação entre os eFuels e outras fontes de energia, como a eletrificação dos veículos e biocombustíveis avançados.

Segundo Prodanov e Freitas (2013), esse tipo de pesquisa é ideal para entender fenômenos que estão surgindo ou para descobrir o que ainda não se sabe sobre um determinado tema. A abordagem utilizada neste trabalho possibilitou entrelaçar as dimensões técnica, ambiental e econômica dos eFuels, resultando em uma análise crítica bem fundamentada, embora restrita pela escassez de dados secundários.

3 IMPACTOS AMBIENTAIS POSITIVOS E NEGATIVOS

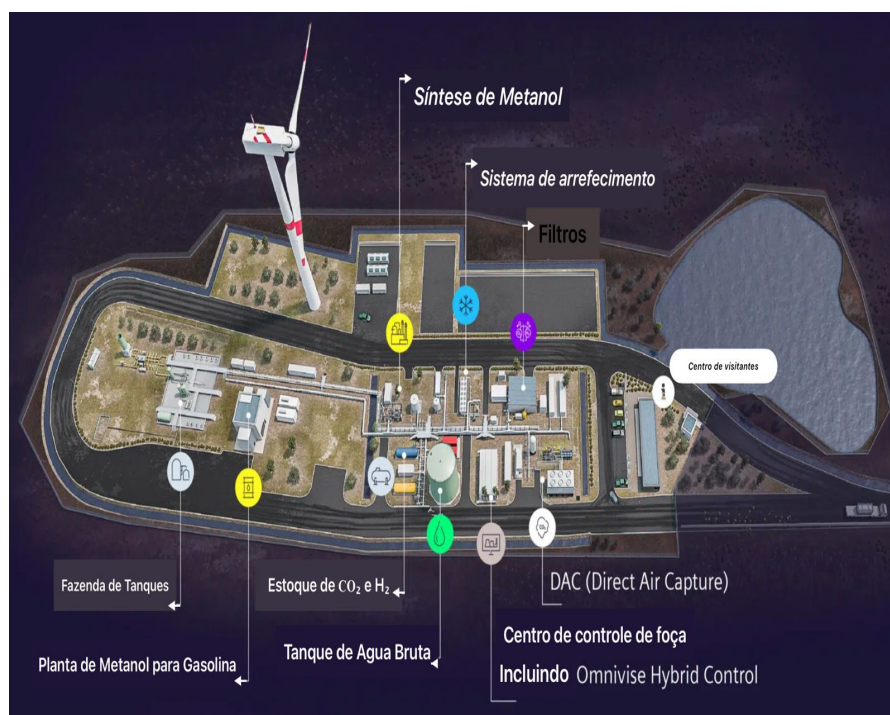
Os eFuels, que são gerados a partir de energia renovável e do CO₂ que é capturado da atmosfera ou de processos industriais, são neutros em carbono ao longo de todo o seu ciclo de vida. Isso implica que a quantidade de CO₂ liberada na queima é igual àquela que foi capturada na sua produção, fazendo deles uma alternativa chave para a descarbonização de setores que são

difíceis de eletrificar, como o transporte rodoviário pesado, o transporte marítimo e a aviação (IEA, 2023a; IRENA, 2023). Contudo, essa neutralidade é fortemente influenciada pela fonte de energia que alimenta o processo e pela eficácia dos sistemas de captura e síntese de carbono.

3.1 Impactos ambientais positivos

A principal vantagem ecológica dos eFuels é de diminuir as emissões líquidas de gases de efeito estufa. A captura direta de CO₂ do ar (Direct Air Capture – DAC) possibilita neutralizar as emissões da queima ao remover previamente o gás da atmosfera (Global CCS Institute, 2021; Carbon Engineering LTD, 2022), conforme a Figura 1.

Figura 1– Esquema da planta de produção Haru Oni.



Fonte: Siemens Energy (2022).

Além disso, aproveita-se a infraestrutura já existente, o que evita os impactos ambientais causados pela construção de novas instalações e edifícios, como na transição para a eletrificação (Porsche AG, 2022). O uso de energia de fontes renováveis, como a energia eólica do projeto Haru Oni, no Chile, garante que todo o processo produtivo funcione com energia limpa, o que elimina as emissões indiretas do processo industrial (Siemens Energy, 2022; PwC Strategy&, 2022).

3.2 Impactos ambientais negativos

Apesar das vantagens para o meio ambiente, os eFuels ainda têm suas limitações. A eficiência energética global é muito menor do que a dos veículos elétricos, dado que a transformação de eletricidade em eFuel resulta em enormes desperdícios energéticos (T&E, 2021; IEA, 2023a). Ademais, a produção dos equipamentos indispensáveis para a captura de CO₂ e eletrólise requer uma grande quantidade de metais e recursos minerais, como aço e cobre, cuja extração pode ter um impacto ambiental significativo se não for feita de maneira sustentável (IRENA, 2023; IEA, 2023a). Além disso, alguns métodos de síntese e purificação podem produzir subprodutos químicos que precisam ser tratados corretamente para evitar a contaminação do solo e da água (Brynnolf; Müller-Langer; Johansson, 2018).

3.3 Comparativo com veículos elétricos

Além da eficiência energética, é crucial analisar o impacto ambiental ao longo de todo o ciclo de vida das tecnologias que estão competindo. A fabricação de baterias de íons de lítio, que alimentam veículos elétricos (BEVs), depende da mineração de lítio, cobalto e níquel, cujas extrações geram danos ambientais e sociais em nações com baixos padrões trabalhistas (Harper *et al.*, 2019; World Bank, 2020).

O descarte e a reciclagem dessas baterias são outro grande desafio: menos de 5% são recicladas em todo o mundo, devido ao alto custo e à complexidade do processo (European Commission, 2023). Enquanto isso, os eFuels não produzem resíduos sólidos perigosos, apenas emissões gasosas que, quando compensadas pela captura de CO₂, podem atingir um balanço neutro.

Dessa forma, os eFuels surgem como uma solução sustentável e complementar aos carros elétricos, especialmente em situações em que a eletrificação não é uma opção prática.

4 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE NO USO DE EFUELS

É preciso, portanto, avaliar a eficiência e a sustentabilidade dos eFuels em um contexto técnico, energético e ambiental. Isso ajuda a entender sua importância na transição energética mundial. Conforme a International Energy Agency (IEA, 2023a), transformar energia elétrica renovável em eFuel, por meio de eletrólise e síntese química, é um processo que, globalmente, tem uma eficiência entre 45% e 55%. Este índice leva em conta todo o ciclo de produção e uso no motor de combustão interna. Apesar de serem menos eficientes do que os veículos elétricos

a bateria, que têm uma eficiência de até 77% (Fraunhofer ISI, 2022), os eFuels têm uma vantagem estratégica: eles utilizam a infraestrutura existente, o que significa que não é necessário fazer uma troca imediata de frotas e redes de abastecimento, conforme mostrado nas Figuras 2 e 3.

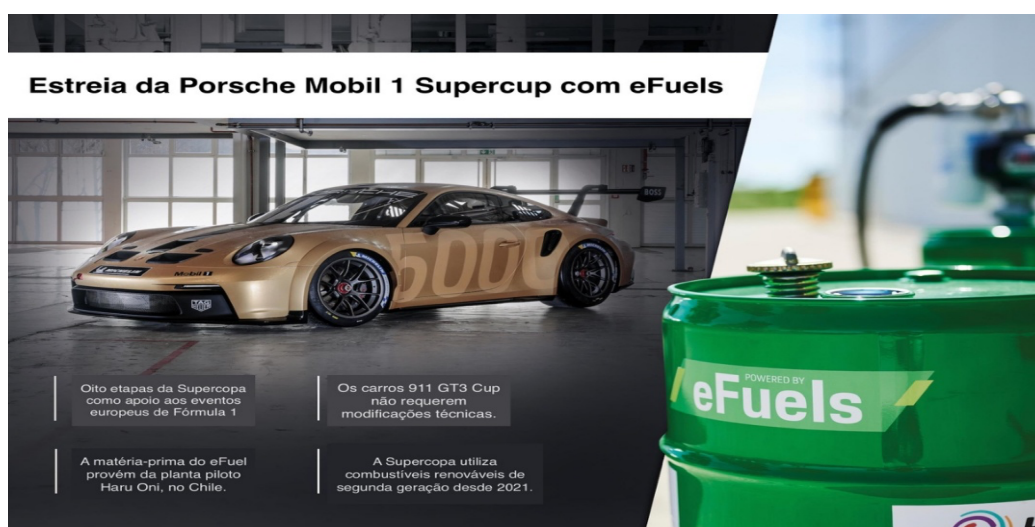
Figura 2 – Veículo comum utilizando o eFuel.



Fonte: Porsche AG (2025).

Os eFuels têm grande potencial para diminuir as emissões líquidas de CO₂, especialmente quando o gás utilizado em sua produção é capturado diretamente da atmosfera ou de fontes industriais inevitáveis (Carbon Engineering, 2022; Global CCS Institute, 2021). Ao usar energia de fontes renováveis, como no Projeto Haru Oni, é possível criar um ciclo de carbono fechado, em que o CO₂ que é emitido durante a queima é igual ao CO₂ que é capturado durante a produção, o que torna a operação neutra em termos de clima.

Figura 3 – Estreia da Porsche com os eFuels.



Fonte: Porsche AG (2025).

Outro aspecto crucial é a pegada ecológica do ciclo de vida dos eFuels. Ao contrário dos veículos elétricos a bateria (BEVs), os eFuels não demandam uma mineração intensiva de minerais críticos, como lítio, cobalto e níquel, cuja extração é prejudicial ao meio ambiente e socialmente problemática nos países produtores (World Bank, 2020; European Commission, 2022). Além disso, eles não enfrentam o grande problema do descarte de baterias, cuja reciclagem é complicada e custosa.

Os eFuels, em termos logísticos, apresentam uma grande vantagem: por serem líquidos à temperatura ambiente, podem ser transportados, armazenados e distribuídos utilizando a mesma infraestrutura que já existe para os combustíveis fósseis, o que minimiza custos e acelera a adoção (PwC Strategy&, 2022). Essa característica se torna crucial em áreas em que a infraestrutura elétrica é escassa ou incapaz de atender ao crescimento da demanda por veículos elétricos.

Para garantir a sustentabilidade a longo prazo dos eFuels, é crucial expandir a produção mundial usando 100% de energia renovável e mantendo os custos competitivos. Conforme prevê a BloombergNEF (2023b), à medida que a tecnologia avança e a produção em larga escala se torna comum, o custo de produção dos eFuels pode reduzir drasticamente até 2040, fazendo deles uma opção econômica e ambientalmente responsável no futuro mix energético global.

5 COMPARAÇÃO AMBIENTAL ENTRE EFUELS E VEÍCULOS ELÉTRICOS (BEVS)

Quando se avalia o impacto ambiental dos eFuels, em comparação com os veículos elétricos a bateria (BEVs), é imprescindível analisar todo o ciclo de vida de cada tecnologia desde a produção, passando pelo uso, até o fim de sua vida útil, de acordo com a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (LCA) regulamentada pela International Organization for Standardization (ISO, 2006). Isso possibilita uma avaliação mais abrangente dos impactos ambientais totais, considerando tanto as emissões diretas quanto as indiretas de carbono.

Os BEVs são ambientalmente benéficos durante a operação, pois não liberam carbono diretamente, desde que a eletricidade consumida venha de fontes renováveis. Entretanto, produzir baterias de íons de lítio exige uma quantidade significativa de energia e minerais essenciais, como lítio, cobalto e níquel. A extração desses minerais pode causar sérios danos ambientais e problemas sociais nas áreas de mineração (World Bank, 2020).

A necessidade de minerais críticos para as baterias de veículos elétricos (BEVs) deverá aumentar drasticamente, com previsões de crescimento de mais de 500% até 2050, para suportar

uma eletrificação em massa (IEA, 2023b). Contudo, o descarte dessas baterias ao final de sua vida útil é um grande desafio ambiental. Apenas 5% das baterias de íons de lítio são recicladas no mundo, uma vez que os métodos de reaproveitamento são limitados e caros (European Commission, 2022). Sem uma infraestrutura de reciclagem sólida, esse passivo ambiental provavelmente aumentará à medida que os BEVs se tornem mais comuns.

Em comparação, os eFuels trazem benefícios operacionais e ecológicos adicionais. Eles permitem a utilização da infraestrutura veicular e de distribuição existente, eliminando a necessidade de substituição de frotas e construção de novas redes de abastecimento (PwC Strategy&, 2022).

Se forem gerados utilizando energia 100% renovável e CO₂ extraído do ar, os eFuels podem ser considerados neutros em carbono ao longo de seu ciclo de vida (Siemens Energy, 2022).

Mas, no geral, a eficiência energética dos eFuels é menor do que a dos BEVs. Conforme a International Energy Agency (IEA, 2023c), a eficiência do “poço à roda” dos eFuels varia entre 45% e 55%, enquanto a dos BEVs ultrapassa 70%. Essa distinção resulta em um aumento no uso de energia renovável para viajar a mesma distância, o que pode ser uma limitação em áreas onde a geração limpa é restrita.

As tecnologias devem ser consideradas complementares e não excludentes. Os BEVs têm uma eficiência maior e são mais indicados para viagens urbanas ou de curta distância, especialmente quando a infraestrutura elétrica é robusta. Os eFuels são vitais para áreas em que a eletrificação é um grande desafio, como a aviação, o transporte marítimo e os veículos pesados, pois oferecem uma alta densidade energética e são compatíveis com motores de combustão interna (Fraunhofer ISI, 2022; IEA, 2023c).

6 ANÁLISES E DISCUSSÕES

Os eFuels, tecnicamente, apresentam uma alternativa viável no que tange à descarbonização do setor de transportes, de acordo com a literatura analisada, principalmente em setores em que a eletrificação apresenta limitações estruturais, como a aviação, o transporte marítimo e o rodoviário de cargas de longas distâncias. Trata-se de uma tecnologia que não visa substituir a eletrificação, mas complementá-la, de forma a diversificar a matriz energética.

Estudos convergem ao considerar que a maior vantagem ambiental dos eFuels está na capacidade de utilizar o dióxido de carbono capturado da atmosfera, estabelecendo um ciclo

fechado de carbono, em que o CO₂ emitido durante a combustão, é compensado pela quantidade capturada durante a sua produção (IEA, 2023a; IPCC, 2023). Essa é a principal característica que diferencia os combustíveis ditos sintéticos, dos combustíveis fósseis convencionais, pois nesses últimos, o que carbono permaneceu armazenado no solo durante milhões de anos, acaba por ser incorporado à atmosfera continuamente.

Há que se considerar também que a neutralidade de carbono dos eFuels, depende de condições bem específicas. A literatura afirma que isso só ocorre quando toda a energia utilizada no processo produtivo advém de fontes renováveis, e quando o dióxido de carbono é obtido por captura direta da atmosfera ou de fontes biogênicas (Global CCS Institute, 2021; Carbon Engineering, 2022). Quando a energia elétrica utilizada advém de combustíveis fósseis e quando o CO₂ é capturado de processos industriais altamente poluidores, o benefício ambiental diminui drasticamente ou até pode deixar de existir.

Nesse sentido, quando analisado o Projeto Haru Oni nota-se que existem características bastante relevantes. A utilização da Energia Eólica, abundante na região patagônica do Chile permite que as emissões indiretas associadas à eletrólise da água e a produção de hidrogênio verde sejam drasticamente reduzidas. Sua localização favorece a geração eólica, que aumenta a eficiência econômica do projeto. Uma de suas limitações está no fato que esse projeto não pode ser replicado em qualquer local do planeta, pois as condições disponíveis nessa região, não são facilmente encontráveis, o que limita a sua expansão.

II

Um ponto extremamente positivo dos eFuels reside no fato de que podem ser utilizados nos atuais motores a combustão, presentes em todos os países, com pouquíssimas modificações, diferentemente do que acontece quando se pensa em eletrificação da frota (PwC Strategy&, 2022). Os eFuels assim, tem o potencial de reduzir muito investimentos em infraestrutura, bem como aproveitar os veículos já existentes, minimizando o descarte de materiais ao meio ambiente.

Considerando a avaliação do Ciclo de Vida dos Produtos, os eFuels merecem destaque. A fabricação de veículos elétricos demanda o consumo de inúmeros materiais, energia e processos industriais complexos. A substituição da frota atual por uma frota elétrica impactaria em custos extremamente elevados, bem como expansão da infraestrutura elétrica dos países (ISO, 2006).

Um aspecto limitante dos eFuels está condicionado à sua eficiência energética: enquanto os veículos elétricos convertem de 70 a 80% da energia armazenada em movimento, os veículos movidos à eFuels, na atualidade, conseguem uma eficiência de apenas 45 a 55%, ou seja, uma

quantidade maior de energia, para percorrer a mesma distância (Fraunhofer ISI, 2022; IEA, 2023c). É em razão disso que a European Commission (2023) recomenda que a prioridade da transição energética, seja a substituição de veículos à combustão por elétricos nos centros urbanos em que existam redes elétricas acessíveis, e que os deslocamentos sejam curtos, ficando os eFuels condicionados a situações em que as baterias promovam uma limitação de autonomia, densidade energética ou tempo de recarga.

Um outro ponto importante quando se trata dos combustíveis sintéticos é o fato de que a produção de veículos elétricos, necessita de minerais críticos como lítio, cobalto, níquel e grafite. A exploração desses minerais provoca grande degradação ambiental, bem como estimula conflitos socioeconômicos em países que os produzem (World Bank, 2020). A IEA (2023b) considera que a demanda por esses metais deverá quadruplicar até 2024, caso as metas globais de mudança da matriz energética sejam cumpridas. Isso desperta outro ponto de preocupação, que é o descarte dessas baterias. Mesmo que a reciclagem esteja acontecendo e seja estimulada pelos governos, o reaproveitamento ainda é muito baixo, principalmente pelos custos extremamente elevados que envolvem esse processo (Harper *et al.*, 2019; European Commission, 2023). Isso limita o processo de economia circular, grande aliada da minimização de impactos ao meio ambiente.

É em razão desses percalços limitantes que a mudança de matriz energética não será feita por apenas uma tecnologia. Pelo contrário, estudos conduzidos pela International Energy Agency (2023a), pela International Renewable Energy Agency (2023) e pelo Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) consideram que é preciso que diferentes alternativas coexistam complementando-se durante os próximos anos. Desse modo, cada país utilizará de soluções mais adaptáveis às suas condições econômicas, geográfica e estruturais.

Ao considerar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), pode-se notar que os eFuels contemplam alguns deles. Por necessitarem de fontes renováveis de energia, principalmente a eólica, estimulam investimentos nessa área, e acabam por estar de acordo com a ODS 7, que diz respeito à energia limpa e acessível. Verifica-se que a ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) pode ser atingida pelo reaproveitamento do carbono atmosférico como matéria-prima industrial, proporcionando uma economia mais circular. Ao produzir combustíveis sintéticos, a partir de hidrogênio verde, os eFuels contemplam a ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima),

pois contribuem na redução de emissões de carbono em setores cuja eletrificação seja muito difícil.

7 CONCLUSÃO

As mudanças climáticas vivenciadas pelo aquecimento global, mostram que a transição energética representa um grande desafio para todas as nações, e, em razão disso, foi objetivo desse estudo analisar os impactos ambientais dos eFuels e compará-los aos veículos elétricos, utilizando como referência o Projeto Haru Oni, buscando compreender o potencial de ambas as tecnologias no que se refere à descarbonização do setor de transportes.

Este estudo, elaborado como uma revisão bibliográfica, mostrou que os eFuels possuem características capazes de contribuir sobremaneira para a redução de emissão de gases de efeito estufa, principalmente quando criados a partir do hidrogênio verde, obtido pela eletrólise da água, utilizando-se de fontes renováveis de energia, como a eólica e capturando dióxido de carbono diretamente da atmosfera, formando um ciclo fechado de carbono, o que reduz a necessidade de extração de combustíveis fósseis.

Fica evidente também pelo estudo, que projetos como o Haru Oni, precisam ser instalados em locais específicos que consigam reproduzir as necessidades estruturais requeridas, não sendo possível implantá-los em qualquer parte do mundo. Mesmo assim, trata-se de um marco importante de solução energética para combater as mudanças climáticas e incorporação em uma economia circular.

A comparação da utilização de combustíveis sintéticos com veículos elétricos mostra que por mais que sejam dispendidos menores recursos, pois os eFuels podem ser utilizados normalmente em veículos a combustão com poucas modificações, eles têm uma eficiência energética muito inferior aos veículos elétricos. Por sua vez, os veículos elétricos apresentam como limitações a necessidade de recarga constante da bateria, a baixa autonomia e alta demanda mineração de materiais críticos para a sua produção, o que se mostra um grande desafio ambiental.

Sob esse prisma, mostra-se que iniciativas como a dos eFuels, ao minimizar a geração de gases de efeito estufa, permitir que veículos já existentes possam ser adaptados para o seu uso, convergem com alguns dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), principalmente as ODS 7 (Energia Limpa e

Acessível), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

Considera-se que esse estudo apresenta limitações, pois possui natureza bibliográfica e documental, sendo fundamentado em dados secundários provenientes de artigos científicos, relatórios técnicos e documentos institucionais. Além disso, boa parte das informações sobre os eFuels advém de projetos-piloto e publicações elaboradas por empresas diretamente envolvidas no desenvolvimento dessa tecnologia, o que evidencia a necessidade de constante confrontação dessas informações com pesquisas independentes.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros desenvolvam análises quantitativas de Avaliação do Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment – LCA), estudos comparativos de custos em diferentes cenários energéticos e avaliações econômicas relacionadas à produção em larga escala dos eFuels. Também se mostra relevante investigar o papel dessa tecnologia em países com elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica, como o Brasil, considerando seu potencial para produção de hidrogênio verde e combustíveis sintéticos destinados tanto ao mercado interno quanto à exportação.

Conclui-se, portanto, que os eFuels não representam uma alternativa excludente em relação aos veículos elétricos, mas sim uma tecnologia complementar, capaz de ampliar as possibilidades de descarbonização do transporte global. O sucesso da transição energética dependerá menos da adoção exclusiva de uma única solução tecnológica e mais da integração de diferentes estratégias, apoiadas pela inovação, pela expansão das energias renováveis e por políticas públicas consistentes voltadas ao desenvolvimento sustentável.

14

REFERÊNCIAS

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.

BLOOMBERGNEF. **Global Hydrogen and Synthetic Fuels Outlook 2023**. New York: Bloomberg Finance L.P., 2023a. Disponível em: <https://about.bnef.com/>. Acesso em: 08 jul. 2025.

BLOOMBERGNEF. **Global Renewable Energy Market Outlook 2023**. New York: Bloomberg Finance L.P., 2023b. Disponível em: <https://about.bnef.com/>. Acesso em: 11 mar. 2025.

BRYNOLF, S.; MÜLLER-LANGER, F.; JOHANSSON, M. Electrofuels for Transport: A Review of Production Costs. **Applied Energy**, v. 227, p. 425-439, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.098>. Acesso em: 22 ago. 2025.

CARBON ENGINEERING LTD. **Direct Air Capture Technology Overview**. Squamish, BC: Carbon Engineering, 2022. Disponível em: <https://carbonengineering.com/>. Acesso em: 30 nov. 2025.

EUROPEAN COMMISSION. **Proposal for a Regulation on the Use of Renewable and Low-Carbon Fuels in Road Transport**. Brussels: European Commission, 2023. Disponível em: <https://transport.ec.europa.eu>. Acesso em: 25 mai. 2025.

FRAUNHOFER ISI. **Efficiency Comparison between eFuels and Battery Electric Vehicles**. Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2022. Disponível em: <https://www.isi.fraunhofer.de/>. Acesso em: 19 abr. 2025.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GLOBAL CCS INSTITUTE. **Global Status of CCS 2021 Report**. Melbourne: Global CCS Institute, 2021. Disponível em: <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>. Acesso em: 10 fev. 2025.

HARPER, G. *et al.* Recycling Lithium-Ion Batteries from Electric Vehicles. **Nature**, v. 575, p. 75-86, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>. Acesso em: 16 dez. 2025.

IEA. **Global Energy Review 2023: CO₂ Emissions in 2023**. Paris: International Energy Agency, 2023a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2023>. Acesso em: 11 jul. 2025.

IEA. **Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector**. Paris: International Energy Agency, 2023b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Acesso em: 19 mar. 2025.

IEA. **Renewable Energy Market Update 2023**. Paris: International Energy Agency, 2023c. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-2023>. Acesso em: 02 fev. 2025.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 14 jan. 2025.

IRENA. **International Renewable Energy Agency**. World Energy Transitions Outlook 2023. Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/publications>. Acesso em: 08 jan. 2025.

ISO. **International Organization for Standardization. Environmental Management: Life Cycle Assessment – Principles and Framework (ISO 14040:2006)**. Geneva: ISO, 2006. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/37456.html>. Acesso em: 05 abr. 2025.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

ONU. **Transformando Nosso Mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável.** Nova York: Organização das Nações Unidas, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em 14 jun 2026.

PORSCHE AG. **Porsche Develops Synthetic Fuel Pilot Plant in Chile (Haru Oni Project).** Stuttgart: Porsche AG, 2022. Disponível em: <https://newsroom.porsche.com/>. Acesso em: 12 dez. 2024.

PORSCHE AG. **Premiere for the Porsche Mobil 1 Supercup with eFuels.** 2025. Disponível em: <https://newsroom.porsche.com/en/2024/motorsports/porsche-mobil-1-supercup-pmsc-efuels-premiere-36052.html>. Acesso em: 10 out. 2025.

PORTER, M. E. **Vantagem competitiva: criando e sustentando um desempenho superior.** Rio de Janeiro: Campus, 1989.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. A. **Metodologia do Trabalho Científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PwC STRATEGY&. **eFuels: A Strategic Contribution to the Decarbonization of Transport?** Frankfurt: PwC Strategy&, 2022. Disponível em: <https://www.strategyand.pwc.com/>. Acesso em: 23 mar. 2024.

SIEMENS ENERGY. **Haru Oni eFuel Project Overview.** Munich: Siemens Energy, 2022. Disponível em: <https://www.siemens-energy.com/>. Acesso em: 14 out. 2024.

T&E. **Transport & Environment.** Electrofuels: What Role in EU Transport Decarbonization? Brussels: Transport & Environment, 2021. Disponível em: <https://www.transportenvironment.org/>. Acesso em: 20 jan. 2024.

WORLD BANK. **Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition.** Washington, DC: World Bank Group, 2020. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/mining/publication/minerals-for-climate-action>. Acesso em: 28 abr. 2024.