

Spin-off Roadmap Tecnológico : Tecnologias para descarbonização no setor de transporte leves e pesados

RESUMO

O setor de transporte rodoviário nacional desempenha um papel fundamental na movimentação de cargas (70% deste segmento) e de passageiros (25% no transporte coletivo e 68% no individual). A forte dependência deste segmento ressalta a urgência de profundas transformações para uma mobilidade mais sustentável, dado que apenas o segmento rodoviário é responsável por 8,6% do total de emissões de CO₂e no país. Veículos leves e pesados contribuem com 3,7% e 4,8% dessas emissões, respectivamente.

Com a evolução tecnológica e o cenário energético nacional, diversas são as trajetórias para a implementação de propulsão e energia eficientes, visando impulsionar a descarbonização do setor de transporte. Neste contexto, uma roadmap tecnológica foi desenvolvida para veículos leves e pesados. Esta iniciativa foi realizada dentro da Associação Brasileira de Engenharia Automotiva, coordenada pela Direção de tendências tecnológicas.

Este artigo tem como propósito fornecer informações de referência, que contextualizam a elaboração desta roadmap dentro do cenário brasileiro, de forma a obtermos uma visão mais clara das tecnologias disponíveis no futuro.

MATRIZ ENERGÉTICA E INFRAESTRUTURA

A disponibilidade de combustíveis renováveis, a ampla instalação de abastecimento de combustíveis líquidos e a tecnologia flexfuel disseminada, indicam a perenidade dos veículos a combustão interna na frota. No entanto, há uma preocupação acerca do combustível utilizado em relação às emissões dos gases do efeito estufa, já que somente 23% do consumo de combustíveis no setor de transporte rodoviário é proveniente de fontes renováveis [1].

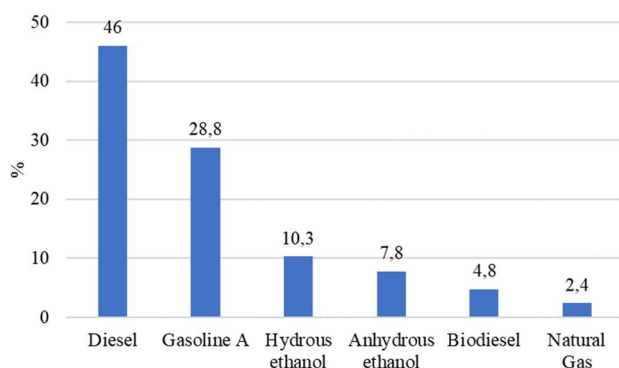


Figura 1. Participação dos energéticos no setor rodoviário
Fonte: [2]

Apesar da utilização de biocombustíveis ser considerável em comparação com as médias globais, o setor de transporte no Brasil ainda é responsável pela maior parte das emissões de CO₂ antrópicas relacionadas à energia. Estima-se que o transporte rodoviário contribua com cerca de 8,6% das emissões totais de CO₂. Veículos leves e pesados contribuem com 3,7% e 4,8% dessas emissões, respectivamente [3].

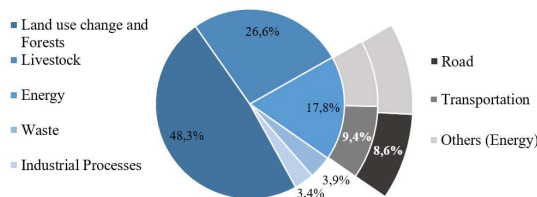


Figura 2. Emissões totais de CO₂ no Brasil por setor
Fonte: adaptação [3]

Os elevados teores de emissões dos combustíveis fósseis, como pode ser visto na tabela abaixo, contribuem para que a intensidade de carbono do setor de transporte de leves e pesados seja significativa, alcançando o patamar de 64,4 e 79,8 gCo2eq/MJ respectivamente [2].

Tabela 1. Intensidade de carbono dos combustíveis utilizados no setor rodoviário (gCO2 eq./MJ)
Fonte: adaptação [2]

	2020	2032
Etanol Anidro	26,88	20,31
Etanol Hidratado	28,52	21,61
Gasolina A	87,40	87,40
Gasolina C(E27)	75,07	73,73
GNV	86,70	86,70
Biodiesel	24,03	21,14
Diesel A	86,50	86,50
Diesel B¹ (BX)	79,84	77,26
Eletricidade	31,77	26,62

Nota 1: Teor de biodiesel de 11,3% (2020) e 15% (2032)

O aumento no uso de combustíveis renováveis tem potencial de reduzir estes níveis de emissões e vir a ser o um dos principais meios de descarbonização do setor de transporte rodoviário. Prevê-se que o Brasil contribuirá com 40% da expansão global de biocombustíveis, principalmente etanol e biodiesel, nos próximos 5 anos, impulsionados pelas políticas sólidas para estes combustíveis e um grande potencial de matéria-prima disponível [4].

Uma alternativa adicional ao diesel é o *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO), também conhecido como Diesel Verde. O HVO é um combustível renovável e, ao contrário do biodiesel que exige restrições devido a formação de borra, resina e umidade, pode ser utilizado puro sem a necessidade de adaptações tecnológicas ou riscos para o motor [5].

O crescimento da oferta de biodiesel e o desenvolvimento do HVO, contudo, trazem consigo desafios significativos. A prevalência da dependência em uma única matéria-prima, a soja, juntamente com a centralização da produção, impacta diretamente nos custos desse insumo e apresenta riscos para o abastecimento de biodiesel [5]. Ainda, a expansão do biodiesel e HVO derivados da soja pode apresentar riscos devido as contribuições de emissões relacionadas a mudanças indiretas no uso da terra (iLUC) [6].

Por outro lado, a expansão do etanol a partir da cana de açúcar não apresenta os mesmos riscos de emissões, desde que a expansão do seu cultivo não seja proveniente de desflorestamento [7]. Adicionalmente, o etanol proveniente do bagaço da cana, conhecido como etanol 2g, promete uma redução de 95% das emissões de CO2 em comparação a gasolina fóssil e não demanda aumento de área cultivada [6], [8].

Estima-se que a oferta de etanol proveniente da cana e do milho aumente até 2032 em 36% e 176%, respectivamente, em relação a oferta de 2021. A produção de etanol lignocelulósico deve atingir cerca de 560 milhões de litros até 2032 [9].

O gás natural já é uma opção consolidada como combustível para automóveis, com uma participação de 2,4% no setor de transporte [10]. Ainda que seja origem fóssil, esse combustível é capaz de reduzir as emissões de GHG e de outros poluentes tóxicos em comparação a gasolina e ao diesel [11]. As projeções indicam que a demanda continuará a acompanhar o crescimento da oferta. Espera-se um aumento significativo de 34% na oferta de gás natural para todos os setores entre 2023 e 2032, impulsionado tanto pelo aumento da produção nacional quanto pela importação [10].

Além disso, o biometano está emergindo como uma alternativa promissora no Brasil. Atualmente, o país conta com 6 usinas de biometano autorizadas pela ANP, com capacidade total de produção de 417,1 mil Nm³ por dia. Ainda mais promissor é o fato de que 17 usinas estão atualmente em construção, visando um acréscimo considerável de 761,9 mil Nm³ nessa oferta diária [12].

Com relação a infraestrutura de abastecimento, menos de 20% dos postos de revenda de combustíveis autorizados fornecem gás natural veicular no Brasil [13]. O desenvolvimento mais distribuído do biometano em todo o território brasileiro tem o potencial de atender futuras demandas por gás que não são supridas pela atual infraestrutura de gasodutos, além de viabilizar uma maior adoção de veículos a gás natural em todo o país [12].

Outro combustível com potencial estratégico para a transição energética é o hidrogênio. Atualmente, a produção de hidrogênio no país é predominantemente realizada por meio da reforma do gás natural (hidrogênio cinza) concentrada nos setores de refino e fertilizantes. No entanto, prevê-se um investimento de US\$ 27 bilhões no Brasil para integrar o hidrogênio verde, proveniente de fontes renováveis, ao setor energético [14].

O Brasil se destaca por seu cenário propício para a produção e exportação de hidrogênio verde devido à sua matriz elétrica renovável e às boas condições geográficas e climáticas. Especificamente, a região Nordeste, com seu crescimento significativo de parques eólicos e solares, além da abundância de água, emerge como um polo atraente para a produção de hidrogênio verde [14].

Ainda, a primeira estação de hidrogênio a partir do etanol do mundo está sendo desenvolvida no Brasil. A planta piloto terá capacidade de produzir 4,5 quilos de H₂ por hora, destinados ao abastecimento de ônibus que operam exclusivamente dentro do campus universitário de São Paulo. Este projeto propõe-se a avaliar as emissões e os custos de produção do hidrogênio por meio da reforma do etanol, buscando equipará-los aos custos de produção do hidrogênio proveniente da reforma do gás natural [15].

Uma outra resposta para reduzir a intensidade de carbono deste setor, é aumento no volume de veículos eletrificados, mas isso gera dúvidas, principalmente em relação ao consumo de eletricidade no país e a capacidade de suprimir essa demanda. A ANFAVEA estima que apenas 1,5% da energia elétrica consumida em 2019 deverá suprir a demanda de BEVs e PHEVs em 2035 [16]. Em 2019, a oferta de energia elétrica no Brasil totalizou 651,3 TWh, enquanto o consumo alcançou 482,2 TWh [17], [18]. Esses números revelam que um aumento de 1,5% no consumo, equivalente a 7,2 TWh, ainda seria inferior à capacidade de geração elétrica disponível no país.

Como parte da solução para a cadeia de geração e distribuição de eletricidade no país, ressalta-se as propostas de investimentos de ampliação da matriz elétrica no Brasil. São esperados R\$ 34 bilhões de investimento em empreendimentos de geração de energia limpa e a construção de 241 usinas solares e parques eólicos no país [19]. Espera-se um aumento de 108GW da capacidade de energia renovável até 2028 [4].

Com a participação de renováveis em grande parte na matriz elétrica (acima de 80%), a adoção da eletrificação no setor de transporte rodoviário será um dos grandes vetores para a redução de emissões dos gases de efeito estufa. Entretanto, se faz necessário aumentar e melhorar a infraestrutura de recarga no país. Atualmente, existem 4631 eletropostos instalados no Brasil e há estimativa de aumento de 10000 pontos de recarga até o fim de 2025. Quase 1/3 da infraestrutura de recarga no Brasil se concentra no estado de São Paulo [20].

A imagem abaixo mostra a disponibilidade de eletropostos de carregamento rápido, com capacidade acima de 50 kWh, em todo o território brasileiro. Observa-se uma extensa área desprovida de pontos de recarga rápida.



Figura 3. Localização de eletropostos de carregamento rápido no Brasil.
Fonte: [21]

REGULAMENTAÇÃO

Atualmente, no Brasil, a trajetória em direção à descarbonização do setor de transporte é guiada pelo estímulo ao desenvolvimento da indústria automotiva e ao uso de combustíveis com baixa pegada de carbono, bem como na promoção da eficiência energética veicular. O Programa Rota 2030 desempenhou um papel crucial nesse sentido, regulando a eficiência energética dos veículos e fomentando a competitividade do setor automotivo nacional. Como resultado, a eficiência energética nunca atingiu patamares tão bons, ficando em 1,54 MJ/km, ante a meta estabelecida de no máximo 1,62 MJ/km [22].

O programa Mover, sucessor Rota 2030, foi criado com novas diretrizes que ampliam as exigências por uma mobilidade mais sustentável e impulsionam o desenvolvimento tecnológico. Estima-se um total de R\$ 19,3 bilhões de créditos financeiros entre 2024 e 2028 de incentivos fiscais condicionados a um investimento mínimo em pesquisa e desenvolvimento. Neste programa está incluso também limites mínimos de reciclagem na fabricação dos veículos e benefícios fiscais para quem polui menos [23].

Além disso, para incentivar e expandir a produção de biocombustíveis e alcançar as metas de redução das emissões de CO₂, foi implementada no Brasil a RenovaBio, como parte da Política Nacional de Biocombustíveis. Por meio do Crédito de Descarbonização (CBIO), no qual cada unidade representa uma tonelada de CO₂ não emitida na atmosfera, ao menos 100 milhões de toneladas de CO₂ já foram evitadas [24].

Outra iniciativa para promover a mobilidade sustentável é a proposta de aumentar a proporção de etanol na mistura de gasolina de 27% para um máximo de 30%, conforme previsto no projeto de lei do Combustível do Futuro. Este projeto também engloba o Programa Nacional de Diesel Verde, que gradualmente implementa o diesel verde na matriz de combustíveis, e a regulamentação dos combustíveis sintéticos e da captura e estocagem geológica de CO₂ [25].

A inserção de biodiesel experimentou uma rápida expansão nos últimos anos, acompanhando o crescimento da indústria da soja, principal matéria-prima do biodiesel brasileiro [76]. Essa expansão foi regulamentada inicialmente pelo Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel. Em 2023, a mistura de biodiesel foi ampliada de 10 para 12% através da resolução do Conselho Nacional de Política Energética, e está prevista para atingir 15% até 2026 [26].

A figura abaixo traz as principais políticas e programas relacionados ao setor de transportes brasileiro.

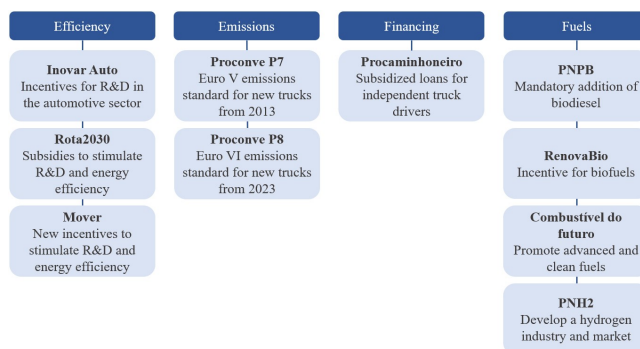


Figura 4. Políticas e programas associados ao setor de transporte brasileiro

Fonte: adaptação [27]

Metas de eletrificação da frota rodoviária ainda não foram totalmente implementadas no país, uma vez que o Brasil não enfrenta a mesma urgência na redução das emissões de poluentes como alguns outros países, o que não demanda, por enquanto, uma aceleração significativa na eletrificação do setor de transporte. De qualquer forma, o programa MOVER conta com incentivos à introdução à eletrificação das seguintes formas: Incentivos fiscais para híbridos movidos com biocombustíveis, bem como redução de IPIs em função da eficiência energética, amplamente vantajosa à veículos eletrificados, sejam híbridos sejam 100% elétricos.

FATOR SOCIOECONÔMICO

Embora haja previsão de investimentos na expansão dos biocombustíveis, na infraestrutura de recarga e por parte das montadoras visando à nacionalização de veículos elétricos e híbridos, surgem dúvidas quanto a capacidade do brasileiro de adquirir veículos de altíssimo rendimento, associados à tecnologias de eletrificação.

A frota circulante está envelhecendo progressivamente em função de uma entrada de novos veículos ainda limitada com relação à “saída” dos antigos do nosso mercado [28]. O custo do carro popular aumentou em mais de 200% ao longo de uma década, enquanto o poder de compra da população diminuiu durante o mesmo período, fatores que parcialmente explicam o aumento da idade média dos veículos [29], [30]. A introdução de novas tecnologias de propulsão eleva o custo dos veículos, dificultando sua adoção. O custo de um veículo elétrico chega em alguns casos ao dobro da versão com motor a combustão interna [31].

Em extrato básico de vendas no Brasil através da FENABRAVE, percebemos que os 10 veículos mais vendidos no Brasil no primeiro semestre de 2024 são de “segmentos de entrada”, não eletrificados. Isto demonstra facilmente que o cliente brasileiro médio está focando massivamente em soluções mais simples, de menor custo. Apesar disto, a chegada de novas soluções eletrificadas em 2024, principalmente impulsionadas por marcas chinesas, aumentaram consideravelmente o percentual utilizado no mercado.

Surge, portanto, a necessidade de incentivos para impulsionar a eletrificação do setor de transporte. Atualmente, não existem incentivos fiscais para a aquisição de veículos elétricos, exceto pela redução ou isenção do imposto de propriedade (IPVA) em alguns estados, representando o único estímulo disponível para os compradores de veículos eletrificados. O imposto de importação de veículos elétricos, que estava zerado até o fim de 2023, volta progressivamente às taxas já existentes aos importados à combustão [32]. A cidade de São Paulo oferece isenção do rodízio para os veículos híbridos, que pode incentivar certos consumidores na compra de veículos com essas tecnologias.

Este cenário de incentivos diverge do europeu. Com metas de vendas de veículos zero emissões já estabelecidas para os próximos anos, 20 países da União Europeia oferecem incentivos para a compra de veículos elétricos, que na Alemanha podem chegar a 6,5 mil euros. Países que não oferece incentivos de compra, no entanto, garante redução ou isenção de taxas [33].

ROADMAP

Com a evolução tecnológica e o cenário energético nacional, diversas são as trajetórias para a implementação de propulsão e energia eficientes, visando impulsionar a descarbonização do setor de transporte. Neste contexto, uma roadmap de descarbonização foi desenvolvida para veículos leves e pesados com o objetivo de prospectar a disponibilidade de tecnologias de motorização, e de energia, nos anos futuros no Brasil. Esta iniciativa foi realizada dentro da Associação Brasileiro de Engenharia Automotiva, coordenada pela Direção de tendências tecnológicas.

A cor azul indica uma maior disponibilidade da tecnologia de powertrain ou energia enquanto a cor cinza mostra o oposto. Ainda, a análise de disponibilidade na roadmap de pesados é segmentada em veículos que percorrem longas e curtas distâncias, conforme exposto a seguir:

Light-duty vehicles

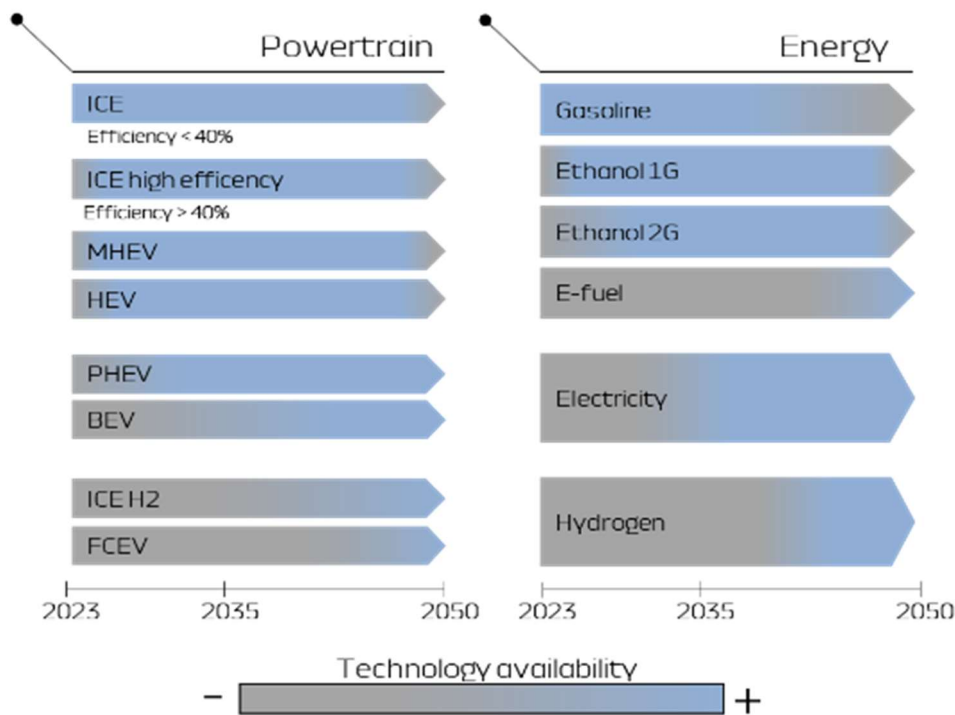


Figura 5. Roadmap tecnológico de veículos leves
Fonte: própria autoria

Heavy-duty vehicles

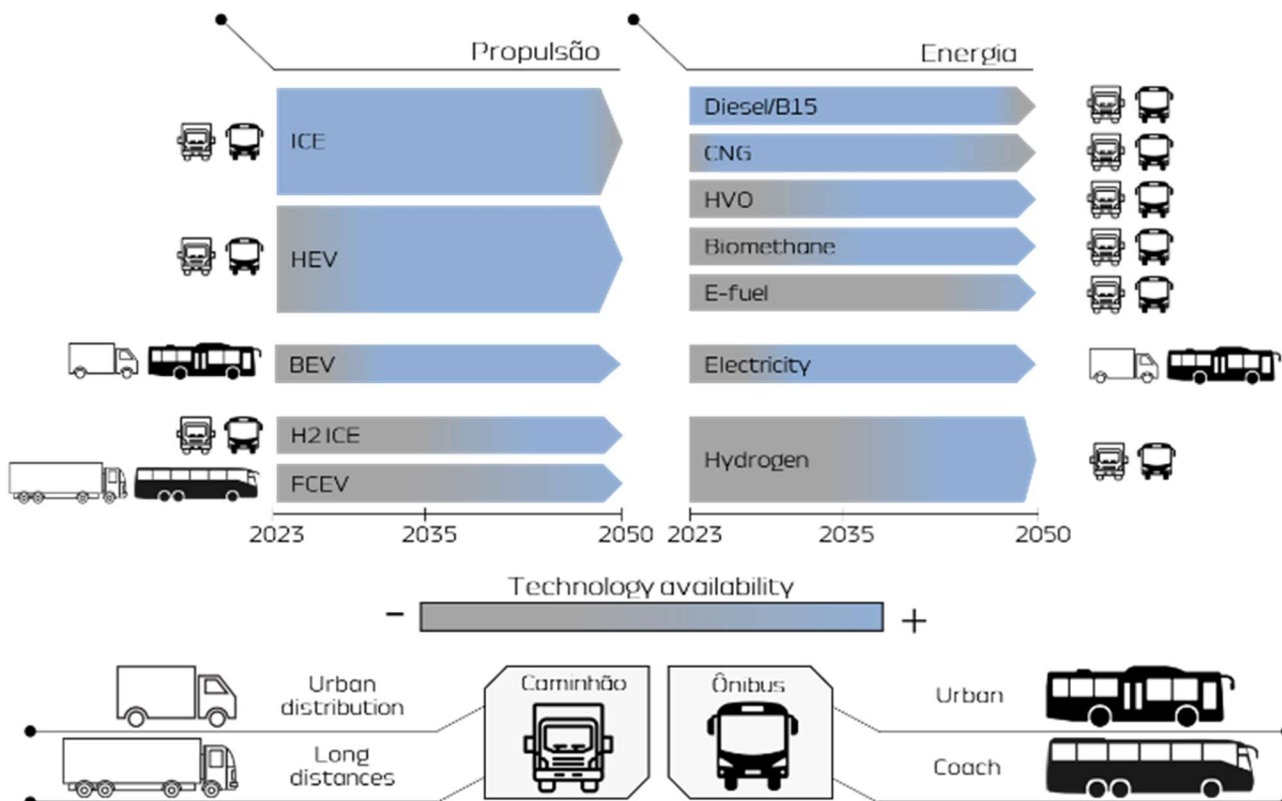


Figura 6. Roadmap tecnológico de veículos pesados
Fonte: própria autoria

A presença de veículos ICE no setor de transporte rodoviário continuará predominante nos próximos anos. Na categoria de veículos leves, onde atualmente há uma maior diversidade de powertrains disponíveis tanto na frota circulante quanto para venda, os veículos com motores a combustão interna manterão sua predominância, seja ele em veículos flex, à gasolina ou híbridos, como ilustrado na Figura 7.

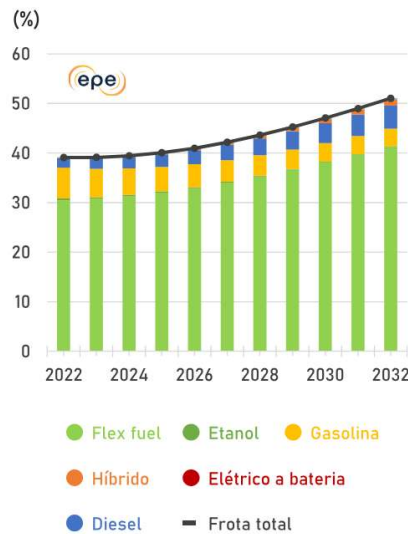


Figura 7. Frota circulante de veículos leves por motorização em %
Fonte: [27]

Apesar das emissões associadas a essa motorização, a adoção de tecnologias que aumentem a eficiência veicular como comando variável de válvulas, injeção direta de combustível, turbocompressores e o sistema start-stop estão gradativamente mais presentes. Associado ao ICE, cresce cada vez mais a utilização de eletrificações, levando o nível de eficiência para outro patamar, bem mais elevado. Desde os Mild-Hybrids até os híbridos Plug-in, penetram no mercado e deverão ser massificados nos anos a seguir.

No entanto, diante de uma frota cada vez mais antiga, é crucial uma maior disponibilidade e incentivo ao consumo de combustíveis com uma pegada de carbono inferior à dos combustíveis fósseis, como os biocombustíveis e os combustíveis sintéticos, visando uma mobilidade mais sustentável.

Enquanto o consumo de biocombustíveis, já amplamente utilizado, continua a crescer, surge a preocupação com o seu impacto ambiental devido ao uso intensivo de terra e matéria-prima. Complementar aos bicombustíveis, os e-fuels surgem como uma alternativa promissora para a descarbonização do setor de transporte.

Os combustíveis sintéticos ainda estão em estágio inicial de desenvolvimento, porém prometem níveis de emissões ainda mais baixos do que os biocombustíveis, dependendo do processo de produção e da fonte de energia utilizada. Além disso, esses e-fuels têm a vantagem de poderem ser integrados à infraestrutura de distribuição e armazenamento existente, requerendo poucas ou nenhuma modificação nos veículos com motores a combustão interna atuais. Ademais, eles podem ser misturados à gasolina convencional, oferecendo uma transição suave para tecnologias mais limpas [34].

As pressões nas regulamentações de emissões estão acelerando a penetração de veículos elétricos na frota global. No Brasil, as vendas de eletrificados quebram recordes a cada ano. Em 2023 houve um crescimento de 91% das vendas de veículos elétricos leves em relação ao ano anterior [35]. Ressalta-se ainda uma importante transição dos eletrificados. Em 2023, veículos à bateria e plug-in representaram quase 56% da venda de eletrificados leves, que até 2022 era representada pelos modelos híbridos [35].

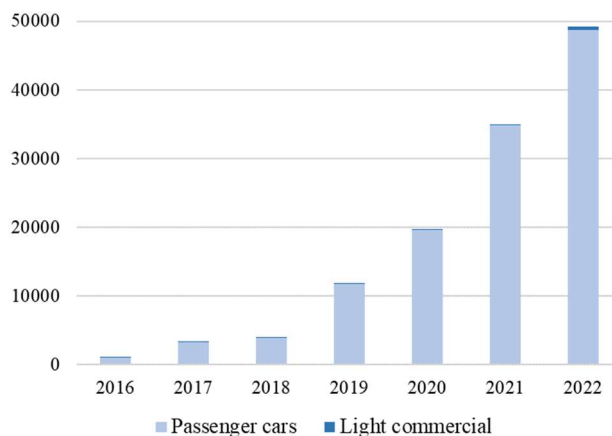


Figura 8. Licenciamento anual de novos veículos leves elétricos

Fonte: [36]

Ainda que tenha muitas barreiras a serem vencidas para que haja a massificação de eletrificados, os incentivos a partir de subsídios, a restrição nas regulamentações de emissões, investimentos das estruturas de recarga e a disponibilidade de novos modelos, devem alavancar a inserção de veículos elétricos.

Além disso, a disponibilidade de modelos de veículos elétricos cresce a cada ano. E ainda que haja uma disparidade na diversidade de modelos ICE e elétricos no mundo, o portfólio de carros elétricos cresceu significativamente, como pode ser visto no gráfico abaixo. No Brasil, analisando os veículos classificados no programa brasileiro de etiquetagem veicular de veículos leves de 2023, dos 975 modelos participantes 182 (18,6%) são elétricos à bateria ou plug-in [98].

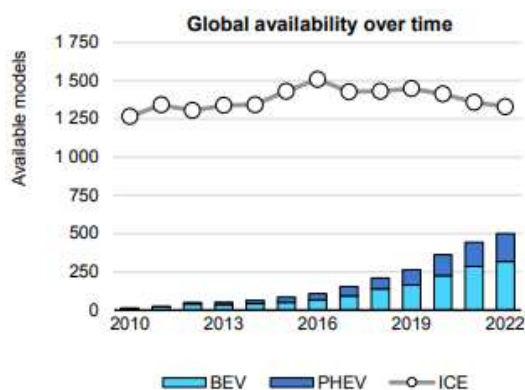


Figura 9. Disponibilidade de modelos de veículos por diferentes tipos de motorização

Fonte: [40]

A dependência do setor rodoviário no transporte de passageiros e de cargas, mostra a necessidade de profundas transformações para uma mobilidade mais sustentável. O setor rodoviário é responsável por 70% do transporte de cargas no Brasil, enquanto a participação do seguimento rodoviário coletivo e individual no transporte de passageiros foi de 25% e 68%, respectivamente [27]. O predomínio da motorização a diesel na frota de caminhões e ônibus em quase toda sua totalidade faz a descarbonização desse segmento ser um grande desafio e que aumenta ano após ano [13].

Prova disso é o volume de vendas de caminhões e ônibus elétricos a bateria, que em 2022 cresceu quase 140% em relação ao ano anterior, mas sua participação nas vendas totais ainda não chega a 1% [13], [37].

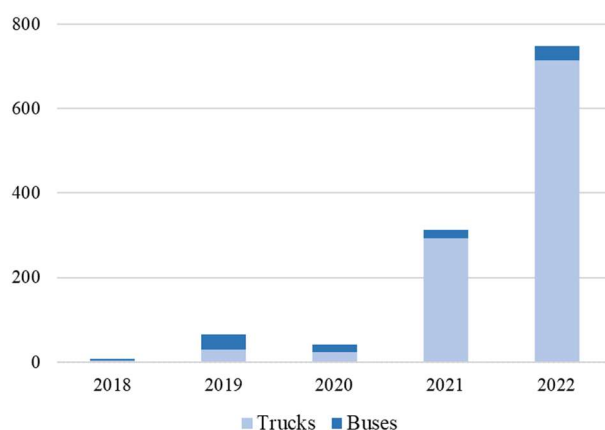


Figura 10. Licenciamento anual de novos caminhões e ônibus elétricos
Fonte: [41]

Além dos gargalos apresentados anteriormente para o segmento de leves, que dificultam a difusão de eletrificados, e que também impactam o setor de pesados, a disponibilidade de modelos elétricos é ainda significativamente menor que veículos leves. Hoje, apenas 12 modelos elétricos estão comercialmente disponíveis no Brasil. Isso pode estar associado à dimensão e o peso das baterias, que também interferem na adoção dessa motorização alternativa devido à redução da capacidade de carga útil. A limitação na autonomia, assim como o tempo de recarga, são fatores que também limitam a inserção de elétricos. O caminhão elétrico de categoria leve mais vendido no Brasil nos últimos dois anos apresenta uma autonomia de 200km [13].

Isso pode explicar o porquê a eletrificação de veículos pesados tende a ser nichada, como é o caso do transporte público. Algumas cidades têm investido na eletrificação da frota de ônibus e já possuem alguns em circulação. Em Curitiba, 70 ônibus elétricos devem ser comprados para o transporte coletivo, e testes com diferentes marcas estão sendo realizados em linhas já existentes. Almeja-se uma frota 100% elétrica na cidade até 2050 [42].

Por isso, a aceleração da integração de eletrificados na frota de pesados será motivada pelas empresas e organizações comprometidas com a redução dos impactos ambientais em toda a cadeia produtiva. Uma maior penetração de elétricos é esperada no setor de caminhões de menor capacidade de carga, e que operam em área urbana ou em rotas de curta distância, possuindo características mais apropriadas para a eletrificação [38].

Outras alternativas para promover uma mobilidade no setor de pesados mais sustentável incluem o gás natural veicular (GNV) e o biometano. Ambos os combustíveis são intercambiáveis entre si em todas as aplicações e são potenciais para reduzir a dependência de importação de diesel [43]. O GNV oferece uma vantagem significativa em termos de preço final por unidade de energia em comparação ao diesel [13]. No entanto, é importante destacar que o GNV é um combustível fóssil, ao contrário do biometano, o qual é produzido a partir de fontes renováveis.

Ressalta-se também que tanto o GNV quanto o biometano enfrentam desafios semelhantes para uma adoção mais abrangente, como a disponibilidade limitada de modelos de veículos pesados e a infraestrutura de abastecimento. Atualmente, somente duas fabricantes dispõem de caminhões a gás natural comercializáveis. Estas mesmas fabricantes anunciaram os testes ou a comercialização futura de ônibus movidos a gás natural [13].

A tecnologia de célula de combustível em veículos ainda está em estágios iniciais, mas mostra-se promissora. Além de serem mais eficientes que os veículos com motores de combustão interna e de não emitirem gases poluentes pelo escapamento, os veículos equipados com célula de combustível oferecem vantagens significativas sobre os veículos elétricos a bateria. Com maior autonomia e tempos de recarga mais rápidos, tornam-se uma solução ideal para veículos pesados que percorrem longas distâncias [44]. Ainda no domínio do Hidrogênio verde, destacam-se desenvolvimentos relacionados ao motor a combustão interna, de alto rendimento, bem como a manutenção de motores atuais, utilizando o e-fuel, já destacado anteriormente. A viabilização das soluções relacionadas ao Hidrogênio Verde passa principalmente pela competitividade na obtenção deste combustível, que ainda está extremamente distante do patamar relacionado aos combustíveis fósseis.

CONCLUSÃO

A Roadmap tecnológica relacionada à descarbonização nos setores de veículos leves e pesados no Brasil está amplamente relacionada à disponibilidade de combustíveis renováveis, bem como aspectos relacionados à fatores socioeconômicos, geográficos, infraestrutura e capacidade de desenvolvimentos e industrializações locais.

Para veículos leves, os motores térmicos ainda representarão uma solução de longo prazo. Porém, com a urgência da descarbonização dentro da mobilidade, as regulamentações e companhias do setor devem estimular um aumento da eficiência dos mesmos até os níveis mais elevados possíveis. A utilização de biocombustíveis, massivamente orientados ao etanol, bem como a introdução da eletrificação, nas suas diversas arquiteturas (*mild HEV, full HEV e PHEV*), devem ser a rota principal neste seguimento.

A eletrificação pura, complementar às soluções mencionadas acima, deverão estar presentes fortemente no seguimento dentro de uma visão de médio e longo prazo.

Caminhos alternativos em veículos leves também serão potenciais rotas, porém, com uma visão mais de nichos, em menor escala. Destas rotas fazem parte as soluções relacionadas ao hidrogênio, seja em células à combustível, seja através de motores à combustão.

Também, a participação de combustíveis sintéticos pode complementar a utilização de etanol, mais em longo prazo.

Veículos pesados passam por rotas potenciais mais variadas no Brasil em função da diversidade de utilização. Pequenas e longas distâncias, utilização dentro de grandes cidades, cargas que vão desde entregas pequenas até grandes cargas são exemplos do amplo escopo de uso.

Assim como nos veículos de passeio, esforços e tecnologia para melhoria do rendimento térmico, aumento da implantação da eletrificação e aumento na taxa de biodiesel traçam a rota mais importante de curto e médio prazo.

Utilizações específicas, de mais curta distância, em grandes centros, tendem a aplicar os 100% elétricos também como solução adicional.

O Hidrogênio verde, associado a células à combustível e motores térmicos, são amplamente discutidos como rota potencial de médio e longo prazo, principalmente onde o 100% elétrico tem mais dificuldade. Esta solução certamente fará parte do painel de soluções, porém infraestrutura e disponibilidade do H₂ verde devem ser viabilizadas.

Outras soluções para contornar a dificuldade de grandes distâncias, são soluções que estão entrando no mercado de “*range extenders*”, principalmente movidos à biocombustível.

Combustíveis alternativos de baixo carbono como HVO e *e-fuels* são parte do escopo e discussão como alternativa complementar ao biocombustível.

O CNG completa o painel e trata-se de rota alternativa desde já.

Em resumo, a pluralidade de soluções no Brasil é reflexo da ampla disponibilidade de energia renovável, uma engenharia competente local, capacidade de pesquisa, desenvolvimento e produção instaladas, além de contextos diversos de utilização. Além disso, regulamentações, engajamentos governamentais e empresariais impulsionarão a tecnologia com foco na descarbonização, até a total neutralidade, foco de 2050.

REFERÊNCIAS

- [1] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Balanço Energético Nacional 2023: Ano base 2022,” 2023.
- [2] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Nota Técnica ‘Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário - Intensidade de carbono das fontes de energia,’” 2022.
- [3] Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), “Estimativas de Emissões.” Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: <https://plataforma.seeg.eco.br/>
- [4] International Energy Agency (IEA), “Renewables 2023 - Analysis and forecast to 2028,” 2024.
- [5] A. Y. Milanez, G. B. da S. Maia, D. D. Guimarães, and C. L. A. Ferreira, “Biodiesel and renewable diesel in Brazil: recent overview and perspectives,” *BNDES*, vol. 28, no. 56, pp. 41–71, Sep. 2022.
- [6] N. Pavlenko and C. Araujo, “Oportunidades e riscos para a expansão continuada dos biocombustíveis no Brasil,” 2019.
- [7] A. Alkimim and K. C. Clarke, “Land use change and the carbon debt for sugarcane ethanol production in Brazil,” *Land use policy*, vol. 72, pp. 65–73, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.landusepol.2017.12.039.
- [8] UNICA, “Etanol.” Accessed: Mar. 01, 2024. [Online]. Available: <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/etanol/>
- [9] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Plano Decenal de Expansão de Energia 2032 - Oferta de Biocombustíveis,” 2022.
- [10] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Plano Decenal de Expansão de Energia 2032 - Gás Natural,” 2023.
- [11] C. A. N. Teixeira, A. P. do A. Mendes, R. C. da Costa, M. A. R. Rocio, and H. F. Prates, “Gás natural - um combustível-chave para uma economia de baixo carbono,” *BNDES*, vol. 27, no. 53, pp. 131–175, Mar. 2021.
- [12] Empresa de Pesquisa Energética (EPE) and Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás), “Panorama do Biometano - Setor Sucroenergético,” 2023.
- [13] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Motorizações alternativas em caminhões e ônibus no Brasil - Contextualização e possíveis trajetórias de inserção,” 2023.
- [14] R. C. de Oliveira, “Panorama do hidrogênio no Brasil,” Instituto de Pesquisa Economica Aplicada - IPEA, 2022. doi: 10.38116/td2787.
- [15] Exame, “Estação de abastecimento de hidrogênio feito a partir de etanol será construída em São Paulo.” Accessed: May 02, 2024. [Online]. Available: <https://exame.com/esg/estacao-de-abastecimento-de-hidrogenio-feito-a-partir-de-etanol-sera-construida-em-sao-paulo/>
- [16] Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), “O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil.” Accessed: Mar. 11, 2023. [Online]. Available: <https://anfavea.com.br/site/estudos-e-apresentacoes/>
- [17] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020: Ano base 2019,” 2020.
- [18] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Balanço Energético Nacional 2020: Ano base 2019,” 2020.
- [19] Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), “Brasil deve ganhar quase 250 usinas eólicas e fazendas solares até 2026, aponta CCEE.” Accessed: Feb. 23, 2024. [Online]. Available: <https://www.ccee.org.br/-/brasil-deve-ganhar-quase-250-usinas-eolicas-e-fazendas-solares-ate-2026-aponta-ccee>
- [20] Poder360, “Brasil vai dobrar quantidade de eletropostos em 2025, diz entidade.” Accessed: May 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.poder360.com.br/infraestrutura/brasil-vai-dobrar-quantidade-de-eletropostos-em-2025-diz-entidade>
- [21] PlugShare, “Charging Location.” Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.plugshare.com/>
- [22] Automotive Business, “O que o Rota 2030 deixou de positivo para o setor automotivo?” Accessed: Apr. 14, 2024. [Online]. Available: <https://automotivebusiness.com.br/pt/posts/setor-automotivo/rota-2030-deixou-positivo-para-setor-automotivo/>
- [23] Ministério do Desenvolvimento Indústria Comércio e Serviços (MDIC), “Mover: Programa de Mobilidade Verde é lançado.” Accessed: Apr. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/12/mover-novo-programa-amplia-acoes-para-mobilidade-verde-e-descarbonizacao>

- [24] Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), “RenovaBio atinge marca de 100 milhões de CBIOs emitidos”, Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/renovabio-atinge-marca-de-100-milhoes-de-cbios-emitidos
- [25] Agência Câmara de Notícias, “Câmara aprova projeto dos ‘combustíveis do futuro.’” Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.camara.leg.br/noticias/1043361-camara-aprova-projeto-dos-combustiveis-do-futuro>
- [26] Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), “Biodiesel.” Accessed: Apr. 25, 2024. [Online]. Available: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/apresentacao>
- [27] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Plano Decenal de Expansão de Energia 2032 - Demanda Energética do Setor de Transportes,” 2023.
- [28] Motor1, “Frota brasileira de veículos envelhece e média já passa dos 10 anos”, Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: <https://motor1.uol.com.br/news/664091/frota-brasileira-veiculos-idade-media/>
- [29] CNN Brasil, “Carro popular encareceu mais de 200% em 10 anos, mostra levantamento.” Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: <https://www.cnnbrasil.com.br/economia/carro-popular-encareceu-mais-de-200-em-10-anos-mostra-levantamento/>
- [30] G1, “Poder de compra do brasileiro cai 5% em 10 anos.” Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2024/01/23/poder-de-compra-do-brasileiro-foi-corroido-quase-que-pela-metade-em-10-anos-entenda.ghtml>
- [31] InsideEVs, “Carro elétrico x combustão: qual é a diferença de preços no Brasil?” Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: <https://insideevs.uol.com.br/features/581047/precos-carros-eletricos-gasolina-brasil/>
- [32] InsideEVs, “Carros elétricos e híbridos voltam a pagar imposto de importação no Brasil.” Accessed: May 16, 2024. [Online]. Available: <https://insideevs.uol.com.br/news/702910/eletricos-hibridos-imposto-importacao-2024/>
- [33] European Automobile Manufacturers’ Association (ACEA), “Electric cars: Tax benefits and purchase incentives (2023),” 2023.
- [34] International Energy Agency (IEA), “The Role of E-fuels in Decarbonising Transport,” 2024.
- [35] Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), “94 Mil Eletrificados: 2023 Bate Todas As Previsões.” Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://abve.org.br/2023-supera-todas-as-previsoes-94-mil-eletrificados/>
- [36] ANFAVEA, “Anuário da Indústria Automobilística Brasileira - Reindustrialização,” 2023.
- [37] FENABRAVE, “Emplacamentos - dezembro/2023,” 2024.
- [38] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Plano Decenal de Expansão de Energia 2032 - Eletromobilidade.”
- [39] Instituto de Metrologia Qualidade e Tecnologia (Inmetro), “Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV) - Tabela de Eficiência Energética de Veículos Automotores Leves 2023,” 2023.
- [40] International Energy Agency (IEA), “Global EV Outlook 2023: Catching up with climate ambitions,” 2023.
- [41] Empresa de Pesquisa Energética (EPE), “Nota Técnica ‘Motorizações alternativas na frota de caminhões e ônibus - Contextualização e possíveis trajetórias de inserção,’” 2023.
- [42] Urbanização de Curitiba (URBS), “Quase 100 mil pessoas já andaram de ônibus elétrico em testes em Curitiba.” Accessed: Apr. 02, 2024. [Online]. Available: <https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/noticia/quase-100-mil-pessoas-ja-andaram-de-onibus-eletrico-em-testes-em-curitiba>
- [43] S. Araújo, “Complementariedade do gás natural e biometano: Uma abordagem sustentável para o futuro energético,” in *10ª Edição Fórum Internacional do Biogás*, São Paulo, 2023.
- [44] D. De Wolf and Y. Smeers, “Comparison of Battery Electric Vehicles and Fuel Cell Vehicles,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 14, no. 9, Sep. 2023, doi: 10.3390/wevj14090262.
- [45] Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), “IPEN/CNEN e Nissan renovam parceria para lançar célula a combustível a etanol no Brasil.” Accessed: Apr. 19, 2024. [Online]. Available: https://www.ipen.br/portal_por/portal/interna.php?secao_id=38&campo=15932