



C A P Í T U L O 9

AVALIAÇÃO DO CUSTO DE DESLOCAMENTO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS, HÍBRIDOS E A COMBUSTÃO PARA O TRANSPORTE RODOVIÁRIO NO ESTADO DA BAHIA

Pedro Almeida

SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil

Pedro Ventin

SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil

Gabriel Borges

SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil

Ricardo Travassos

SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil

Gabriel Sampaio

SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil

Heloisa Althoff

Petrogal, Rio de Janeiro, Brasil

André Fonseca

Galp, Lisboa, Portugal

RESUMO: Diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, o setor de transportes tem explorado alternativas focadas na redução das emissões de carbono. Nesse contexto, a indústria automotiva tem avaliado o uso de veículos alternativos como os elétricos e os movidos a célula a combustível, sendo registrado um aumento de aproximadamente 300% no número de veículos a hidrogênio entre 2019 e 2023. Dessa forma, a fim de avaliar os custos associados à rodagem desses veículos, este estudo analisou os custos de abastecimento de caminhões com diferentes propulsões: diesel, elétrico por baterias, e elétrico com célula a combustível, incluindo uma comparação entre os gastos energéticos nesses sistemas. O custo do diesel foi baseado no preço da distribuidora Acelen na Bahia, enquanto o custo da eletricidade utilizou-se do parâmetro *Levelized Cost of Energy*, através do caderno de preços de geração da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2021, com a aplicação dos reajustes para o estado da Bahia nos anos subsequentes até 2024. O valor do

hidrogênio teve os seus custos estimados para produção no SENAI CIMATEC, no estado da Bahia. Concluiu-se que os caminhões movidos a hidrogênio apresentaram custos por quilômetro mais elevados devido às despesas associadas à produção do hidrogênio. Os elétricos apresentaram menores custos devido ao menor custo da eletricidade, porém, com menor capacidade de transporte de carga útil, enquanto os veículos a diesel demonstraram custos intermediários.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrogênio, Descarbonização, Transporte, LCOE, LCOH.

INTRODUÇÃO

Devido às buscas por menores emissões de poluentes, o setor de transportes tem buscado alternativas visando a descarbonização e o uso de combustíveis alternativos. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA) (2022), o uso de caminhões e ônibus corresponderam a 29% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) no setor de transportes, enquanto os caminhões pesados representaram 52% dessas emissões. Segundo Barger *et al.* (1966), a eficiência térmica dos motores diesel em 1966 era de 35%. Em 2018, essa eficiência aumentou para 45%, segundo Tansini *et al.* (2018). Apesar disso, os motores elétricos ainda apresentam um maior rendimento, e, portanto, a indústria automotiva tem avaliado o uso de veículos alternativos como os elétricos e os movidos a célula a combustível. A IEA (2023) registrou um aumento de aproximadamente 300% no número de veículos a hidrogênio entre 2019 e 2023, com previsão de um *market share* de 17% do mercado de automóveis para 2050, segundo Manoharan *et al.* (2019). Apesar dos avanços tecnológicos, desafios importantes para a implementação destes veículos ainda não foram superados, especialmente aqueles relacionados à infraestrutura de abastecimento: segundo a IEA (2023), existem 1100 estações de abastecimentos ao redor do mundo, além de outros desafios como a grande variação no preço do custo de produção e distribuição do hidrogênio. Em relação aos veículos à combustão e elétricos, o preço do combustível diesel e da tarifa de energia elétrica no mercado brasileiro apresentaram um aumento, de acordo com os preços fornecidos pela Acelen (2021) (2024) e pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2022) (2023) (2024), de 10% e 33% respectivamente, no período de 2021 a 2024. Neste contexto, este estudo analisou os custos de deslocamento, relacionados ao abastecimento, bem como realizou uma comparação entre os gastos energéticos de veículos de transporte rodoviário similares com diferentes propulsões: motor a diesel, motor elétrico por baterias (BEV), e motor elétrico com célula a combustível (híbrido FCEV) no estado da Bahia.

METODOLOGIA

O objetivo do trabalho foi identificar o custo por quilômetro rodado (US\$/km) no estado da Bahia, com diferentes fontes de energia, em caminhões da categoria superior a 23 toneladas (T) de peso bruto total combinado (PBTC), segundo a Texaco (2017), denominados de “carretas”. A metodologia utilizada foi baseada no parâmetro “custo total de propriedade por quilômetro”, conforme Opoku *et al.* (2023), que por sua vez utilizou a metodologia do “custo total de propriedade” (TCO). O método do autor utilizou dados abrangentes como: especificações do veículo, consumo de combustível, preço de compra do veículo, custo em reparos e manutenções, distâncias diárias percorridas, impostos e seguro. No presente trabalho, foram pesquisados apenas os custos relacionados ao abastecimento, sendo assim foi desenvolvida uma revisão com base em dados primários, extraídos publicamente dos fabricantes dos automóveis bem como de órgãos competentes, e secundários, calculados a partir de tais informações. Dessa forma, os custos de abastecimento total de cada caminhão (C) foram divididos pelas suas respectivas autonomias (A) descritas pelos fabricantes ou calculadas nos tópicos subsequentes desse trabalho, resultando no custo por quilômetro rodado (C/km). Para os casos do hidrogênio e da energia elétrica, foi utilizado o método dos custos nivelados (*Levelized Cost of Hydrogen* e *Levelized Cost of Energy*), que correspondem aos custos médios de geração ao longo da vida útil de cada fonte de energia, conforme a IBM (2024). O custo do combustível diesel utilizou a média dos preços às distribuidoras de diesel S10 (sem tributos) no estado da Bahia. Esta decisão foi realizada devido a este ser o custo direto de obtenção para as distribuidoras de combustível e tornar este valor comparável ao método dos custos nivelados.

Paralelamente ao objetivo principal, esse trabalho incluiu, também, uma revisão bibliográfica sobre o teor energético de combustíveis usados nesses diferentes caminhões, da mesma categoria, comparando estas tecnologias. A comparação foi feita com o intuito de entender os diferentes gastos energéticos relativos a cada fonte de energia utilizada como combustível. Para isso, foi feito um cálculo de capacidade energética de cada caminhão, e seus respectivos gastos energéticos, baseados no parâmetro “fatores de consumo” (FC) de cada caminhão, conforme Campos, Punhagui e John (2011). Uma vez que as diferentes fontes de energia dos caminhões possuem diferentes unidades de medida, o parâmetro “FC” do método dos “fatores de consumo” foi modificado para “Mega Joules”, assim se tornando “MJ”, possibilitando os respectivos cálculos de conversão, como explicado mais a fundo nos tópicos subsequentes.

O caminhão a hidrogênio escolhido para o comparativo foi da fabricante GWM (*Great Wall Motors*), devido a fabricante anunciar uma fase experimental de veículos a hidrogênio no Brasil, com a ideia de desenvolver parcerias com empresas locais e

realizar o fornecimento de sistemas de célula a combustível para desenvolvimento e produção desse tipo de veículo futuramente no país, segundo o Estadão (2024). O caminhão *Battery Electric Vehicle* (BEV) escolhido foi o “*Nikola Tre BEV*”, uma vez que, dentre os caminhões BEVs pesquisados, ele apresentou o menor peso em ordem de marcha. Esse fato é importante pois, quando maior é essa massa do veículo, menor será a capacidade de carga útil a ser transportada. O caminhão a diesel escolhido foi o “*Hyundai Xcient Diesel*”, por conta da sua ampla quantidade de especificações disponíveis, o que foi relevante para pesquisa dos dados usados nesse comparativo. Todos os caminhões utilizados nesse trabalho (Figura 1) têm usos compatíveis globalmente, com faixa de PBTC variando entre 40 e 50 T. O PBTC é a soma do peso em ordem de marcha do veículo mais a massa da carga que ele pode transportar.



Figura 1 – Respectivamente, GWM, Nikola Tre BEV, Hyundai Xcient Diesel.

Fonte: Respectivamente, GWM (2024), Nikola (2024) e Hyundai (2024).

Metodologia para determinação do Custo Nivelado do Hidrogênio (LCOH)

Para o Custo Nivelado do Hidrogênio (LCOH), utilizou-se o custo com base em fonte de água subterrânea para plantas com capacidade de 20MW na Bahia de 2021, calculado por Santana *et al.* (2024), demonstrado no Gráfico 1. O custo foi atualizado para 2024 através do índice de custo de instalações de engenharia química da *Chemical Engineering* (2024). O valor original era de 8,32US\$/kg, e com o acréscimo de 12,7% devido a atualização, resultou em 9,38US\$/kg. O valor do LCOH foi obtido por Santana *et al.* (2024) utilizando uma análise quanto ao preço da energia elétrica com base em dados da Confederação Nacional da Indústria (CNI), bem como custos de investimento em captação e armazenamento de água. Os dados da unidade de eletrólise por Santana *et al.* (2024) consideraram uma vida útil da pilha de 90000 horas num sistema de 100 MW com produção de hidrogênio a 40 bar e 70 °C. A capacidade da planta de 20MW foi escolhida devido à proximidade com a capacidade média antecipada das plantas em construção na Europa segundo a *European Hydrogen Observatory* (2023).

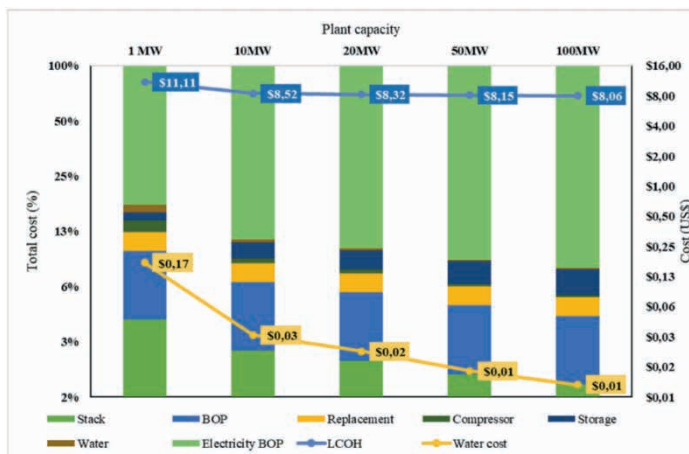


Gráfico 1 – Valor do custo nivelado de hidrogênio de acordo com a capacidade da planta de produção.

Fonte: Santana et al. (2024, p. 357).

Metodologia para determinação do Custo Nivelado de Energia (LCOE)

Apesar da maior disponibilidade de informações técnicas referentes ao custo de energia elétrica no Brasil, foi considerada nesta pesquisa o custo de produção de energia através de fontes renováveis. Esta escolha foi realizada devido a produção de energia elétrica no SENAI CIMATEC ser advinda de fontes renováveis. Foi realizada uma média da faixa de valores de LCOE para todas as fontes renováveis da EPE (2021), demonstradas no Gráfico 2. Uma vez que os valores correspondem ao ano de 2021, foi admitida uma atualização para os anos subsequentes até 2024 através da porcentagem de reajuste das tarifas para o consumidor da Neoenergia Coelba, conforme aprovadas pela ANEEL (2022 - 2024). O valor final foi convertido para o dólar comercial com a cotação do dia 10/12/2024 segundo o Banco Central do Brasil (BCB, 2024). O valor final foi de R\$ 0,3896 por kWh, sendo o equivalente a US\$0,0644 por kWh.

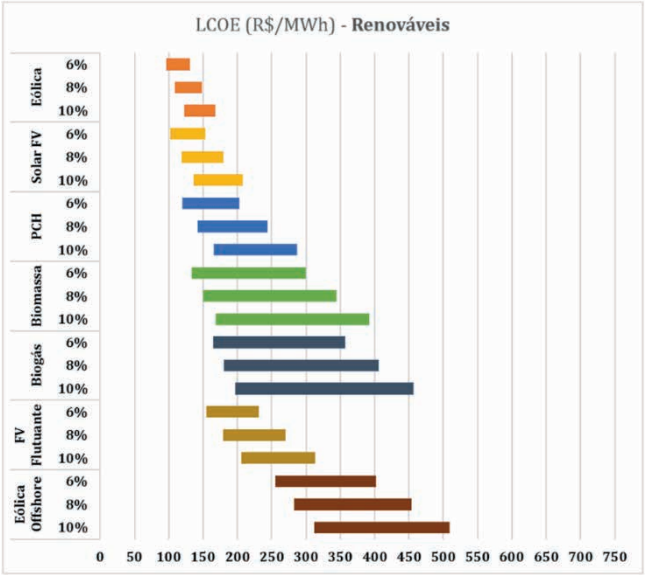


Gráfico 2 – Valor do custo nivelado de energia de acordo com a fonte de energia.

Fonte: EPE (2021, p .51).

Metodologia para determinação do custo do diesel

Semelhante ao realizado para os custos de hidrogênio e eletricidade, foram considerados os custos do diesel combustível comercial S10 sem tributos, à vista, por vigência, fornecido pela Acelen (2024) na data de 05/12/2024, no estado da Bahia. O valor final foi convertido para o dólar comercial com a cotação do dia 10/12/2024 segundo o BCB (2024). O valor final foi de R\$3,6621 por litro, sendo o equivalente a US\$0,6053 por litro.

CÁLCULO DO GASTO ENERGÉTICO

Energia total: diesel

No caso do combustível diesel, foi realizado o cálculo estimado do poder calorífico do combustível, considerando o diesel comercial brasileiro que é composto por 14% de biodiesel (em vol.). Desta forma utilizou-se o poder calorífico calculado por Da Silva e Tôrres (2013), demonstrado no Gráfico 3.

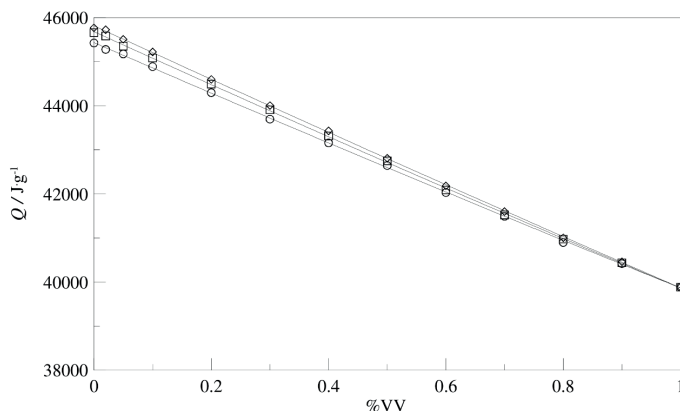


Gráfico 3 – Poder Calorífico Superior (PCS) do diesel em função da fração de volume de biodiesel.

Fonte: Da Silva e Tôrres (2013, p. 06).

Como o valor no Gráfico 3, corresponde ao poder calorífico superior mássico PCS_{mass} do diesel B14, foi necessária a conversão para o poder calorífico inferior mássico PCI_{mass} . O poder calorífico inferior (PCI) é a energia gerada pela queima de uma massa de combustível, subtraindo-se a energia necessária na geração e absorção de calor pelo vapor d'água. Para este cálculo, são utilizados os teores mássicos de hidrogênio e oxigênio do combustível, conforme relatado por Van Wylen e Sonntag (2003) e Heywood (2018). Entretanto, com base em Erdogan (2021) e Giakoumis e Sarakatsanis (2018), o fator de correção do poder calorífico superior (PCS) para o PCI é de aproximadamente 6%. O poder calorífico encontrado no Gráfico 3, reduzido do fator de correção de 6%, resultou num valor de poder calorífico inferior mássico de Diesel S10 B14 de 42,3 MJ/kg de combustível, como demonstra a Equação 1. Segundo Da Silva e Tôrres (2013), a densidade desse combustível, como descrito no Gráfico 4, é de 0,845 kg/L a 20°C. Assim, como consta na Equação 2, concluímos que o poder calorífico inferior volumétrico PCI_{vol} do Diesel S10 B14 é de 35,74 MJ/L.

Uma vez que o caminhão a diesel escolhido tem um tanque de combustível com capacidade para 400 litros, temos que a energia total do tanque é de 14.297,40 MJ.

$$PCI_{mass} = PCS_{mass} \cdot 0,94 = 42,3 \text{ MJ/kg} \quad (1)$$

$$PCI_{vol} = PCI_{mass} \cdot 0,845 = 35,74 \text{ MJ/L} \quad (2)$$

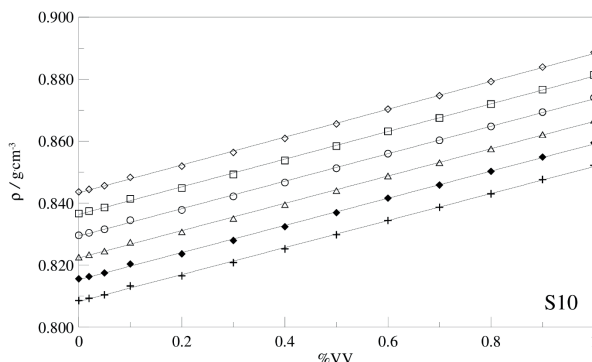


Gráfico 4 – Densidade do diesel S10 em função da fração de volume de biodiesel.

Fonte: Da Silva e Tôres (2013, p .02).

Energia total: hidrogênio

Para o PCI do hidrogênio, o valor de 120 MJ/kg foi obtido conforme o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) (2020), e é demonstrado no Gráfico 5. Uma vez que o caminhão a hidrogênio escolhido tem um tanque de armazenamento com capacidade para 40 quilogramas de H_2 , temos que a energia total do tanque de é de 4800 MJ.

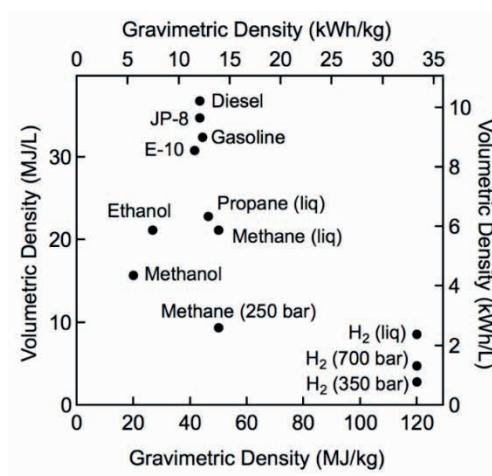


Gráfico 5 – PCI do hidrogênio.

Fonte: DOE (2020, p. 01).

Energia total: eletricidade

A energia total da bateria do caminhão BEV foi encontrada multiplicando a capacidade dela de 613 kWh pelo fator de conversão padrão de 3,6 MJ para cada kWh. Assim, a energia total da bateria é de 2.206,80 MJ.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Gasto energético total e relativo

Dessa forma, o poder calorífico de cada combustível foi multiplicado pela capacidade de armazenamento da fonte de energia de cada caminhão, o que resultou na energia total correspondente de cada caminhão (Tabela 1). Ainda, observa-se gasto energético por quilômetro rodado de cada caminhão, obtido através da divisão da energia total pela autonomia de cada um.

	Tre BEV	Xcient Diesel	GWM FCEV
Autonomia (km)	531	1120	500
Capacidade energética (kWh, L, kg)	613	400	40
Energia total (MJ)	2.206,80	14.297,40	4.800,00
MJ/km (vazio)	2,24	6,89	5,18
MJ/km (carregado)	4,16	12,77	9,60

Tabela 1 – Energia total e gasto energético por quilômetro rodado (2025).

Para a autonomia do caminhão a diesel, foi utilizado o consumo de 2,8 km/litro de combustível, calculado por Coyle (2007). Já para os outros dois caminhões, foi utilizada a autonomia divulgada oficialmente pelas fabricantes. Para o consumo de energia dos caminhões vazios, foi utilizado um fator de multiplicação de 0,54, obtido através da média entre os fatores de aumento de consumo conforme aumento da carga dos caminhões, calculado com dados de Coyle (2007). Esses dados são demonstrados no Gráfico 6.

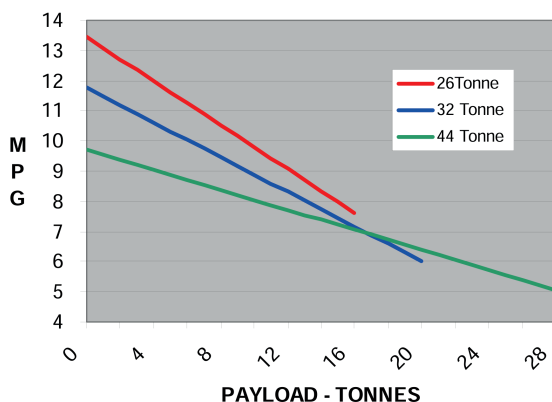


Gráfico 6 – Fatores de aumento de consumo conforme aumento da carga.

Fonte: Coyle (2007, p. 25).

Assim, foi feito um cálculo de gasto energético por quilômetro por tonelada $MJ/T.km$, como consta na Equação 3, através da divisão entre o gasto energético por quilômetro MJ/km pelo PBTC de cada caminhão. Para o caminhão a diesel, foi utilizado o PBTC conforme o teste de consumo de combustível vs. capacidade de carga por Coyle (2007). Para os outros modelos, foi utilizado o PBTC máximo divulgado pelo fabricante.

$$MJ/T.km = MJ/(PBTC . km) \quad (3)$$

	Tre BEV	Xcient Diesel	GWM FCEV
PBTC (T)	37,20	44,00*	49,00
MJ/T.km	0,11	0,29	0,20
Eficiência relativa ao BEV (%)	100%	39%	57%

Tabela 2 – Gasto energético por tonelada por quilômetro e eficiência relativa (2025).

*Massa correspondente ao caminhão utilizado no teste de consumo de combustível por Coyle (2007).

Como observa-se na Tabela 2, o caminhão elétrico apresentou o menor gasto energético, então, o cálculo da eficiência relativa foi feito com relação a ele. Logo, quando comparados os três tipos de caminhões, o de propulsão diesel mostrou-se o pior no quesito gasto energético e o caminhão a hidrogênio ficou com valor intermediário.

Custo por quilômetro rodado

O custo total de abastecimento C_{abas} foi obtido, conforme a Equação 4, através da multiplicação do custo por fonte de energia C_{fonte} (US\$/kWh, L, kg) discutidos nos itens do tópico 3 deste trabalho pela capacidade energética C_{ener} de cada veículo (kWh, L, kg), discutidas no tópico 4.1 e fornecidas por cada fabricante. O custo por quilômetro rodado C_{km} foi obtido, conforme a Equação 5, através da razão do custo total de abastecimento C_{abas} de cada veículo pelas suas respectivas autonomias A .

C_{abas} = C_{fonte} \cdot C_{ener} \tag{4}

C_{km} = \frac{C_{abas}}{A} \tag{5}

	Tre BEV	Xcient Diesel	GWM FCEV
Capacidade energética (kWh, L, kg)	613	400	40
Custo por fonte de energia (US\$/kWh, L, kg)	0,06	0,60	9,38
Custo total de reabastecimento (US\$)	39,53	242,52	375,20
Custo por km rodado (US\$/km)	0,07	0,21	0,75

Tabela 3 – Custo por quilômetro rodado de cada veículo (2025).

Analisando-se os resultados na Tabela 3 constatou-se que o caminhão BEV possui o menor custo por quilômetro rodado, sendo o caminhão a hidrogênio com o custo mais alto e o caminhão a diesel apresentando um valor intermediário. É importante ponderar questões contextuais como o fato de que esses valores levaram em conta o custo de produção de cada fonte de energia (não considerando custos relacionados a distribuição ou impostos), como explicados no tópico 3.

Outro ponto de observação é que o caminhão BEV necessita, segundo o fabricante, de 90 minutos de recarga para alcançar o nível de 80% de sua bateria, e só consegue fazê-lo nesse tempo com um carregador de 350 kW, o que exige uma infraestrutura elétrica adequada. No caso do caminhão a hidrogênio, segundo a Sociedade de Engenheiros Automotivos (SAE) (2020), o tempo de abastecimento depende da taxa de fluxo do Sistema de Reabastecimento de Hidrogênio (HRS), bem como da temperatura ambiente, temperatura de entrega do combustível (por exemplo, -40°C, -30°C e -20°C) e da pressão inicial do tanque do veículo.

De acordo com Xu *et al.* (2022) e Caponi *et al.* (2021), para o caso de um tanque de 40 kg e 350 bar (como é o caso do caminhão da GWM) e taxa de fluxo variando entre 2,0 kg/min e 4,5 kg/min, o tanque demoraria entre 8 e 20

minutos para ser completamente abastecido. Isso representa (para uma condição extrema) uma diferença de 70 minutos entre o caminhão BEV e o à hidrogênio, o que, considerando uma carga horária diária de 8 horas de trabalho, significa uma diminuição quantitativa de tempo de operação do veículo de aproximadamente 14,6%, sendo essa uma desvantagem do veículo somente à bateria, no caso da necessidade de recarregamento durante o expediente.

Outra questão importante é o fato de que caminhões elétricos possuem grandes e pesadas baterias, como discutido na metodologia desse trabalho, pois isso reduz a capacidade de transporte de carga útil do Nikola Tre BEV: segundo os fabricantes, a massa do caminhão elétrico vazio é de 13,3 toneladas, contra 10,8 toneladas do caminhão a hidrogênio da GWM, significando menos 2,5 toneladas, o que no caso do caminhão elétrico, representa aproximadamente 10,5% de sua capacidade de transporte de carga útil.

Em rotas longas, onde o reabastecimento durante o expediente se faz necessário, e em casos em que a capacidade de carga máxima é utilizada, esses dois fatores podem acabar inviabilizando a operação do caminhão BEV, sendo os caminhões a diesel e a hidrogênio mais indicados para grandes distâncias.

CONCLUSÕES E/OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

O comparativo deixou claro, como consta na Tabela 3, que o custo por quilômetro rodado do caminhão BEV é menor, mas fatores como maior tempo de recarga e menor capacidade de carga útil podem diminuir a competitividade do veículo e tornar a sua operação inexequível para grandes distâncias. Nesses casos, os caminhões a hidrogênio e a diesel, com um abastecimento mais rápido e maior capacidade de carga útil, se demonstram mais viáveis que o elétrico. Além disso, o comparativo de gasto energético total e relativo, evidenciados na Tabela 2, deixou claro que o caminhão a hidrogênio é mais energeticamente eficiente que o veículo a diesel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACELEN. **Preços às Distribuidoras | Acelen - Energia para acelerar.** Disponível em: <<https://www.acelen.com.br/precos-as-distribuidoras/?produto=7&ano=2021&mes=12#resultados>>. Acesso em: 31 mar 2025 às 15h04.

ACELEN. **Preços às Distribuidoras | Acelen - Energia para acelerar.** Disponível em: <<https://www.acelen.com.br/precos-as-distribuidoras/?produto=7&ano=2024&mes=12#resultados>>. Acesso em: 17 mar 2024 às 14h39.

ANEEL. **ANEEL aprova novos índices tarifários para a Neoenergia Coelba.** Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/aneel-aprova-novos-indices-tarifarios-para-a-neoenergia-coelba>>. Acesso em: 17 mar 2025 às 14h38.

ANEEL. **ANEEL aprova reajuste tarifário de 21 permissionárias.** Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/aneel-aprova-reajuste-tarifario-de-21-permissionarias>>. Acesso em: 17 mar 2025 às 14h37.

ANEEL. **Novas tarifas da Neoenergia Coelba são aprovadas pela ANEEL.** Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/novas-tarifas-da-neoenergia-coelba-sao-aprovadas-pela-aneel>>. Acesso em: 17 mar 2025 às 14h36.

ANEEL. **Reajuste tarifário anual da Coelba é aprovado.** Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/reajuste-tarifario-anual-da-coelba-e-aprovado>>. Acesso em: 17 mar 2025 às 14h35.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Cotações e boletins.** Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/estabilidadefinanceira/historicocotacoes>>. Acesso em: 17 mar. 2025 às 14h34.

BARGER, E.; LILIEDAHL, J.; CARLETON, W.; MCKIBBEN. **Tratores e Seus Motores.** São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1963. p. 04-100.

CAMPOS, E. F.; PUNHAGUI, K. R. G.; JOHN, V. M. **Emissão de CO2 do transporte da madeira nativa da Amazônia.** Ambiente Construído, v. 11, n. 2, p. 157–172, 1 jun. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000200011>>. Acesso em: 14 mar 2025 às 16h00.

CAPONI, R.; FERRARIO, A. M.; BOCCI, E.; VALENTI, G.; PIETRA, M. D. **Thermodynamic modeling of hydrogen refueling for heavy-duty fuel cell buses and comparison with aggregated real data.** International Journal of Hydrogen Energy, v. 46, n. 35, p. 18630–18643, maio 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.224>>. Acesso em: 14 mar 2025 às 15h58.

CHEMICAL ENGINEERING. **The Chemical Engineering Plant Cost Index.** Disponível em: <<https://www.chemengonline.com/pci-home>>. Acesso em: 20 nov 2024 às 15h31.

COYLE, M. **EFFECTS OF PAYLOAD ON THE FUEL CONSUMPTION OF TRUCKS.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://imise.co.uk/wp-content/uploads/2017/09/RR5-Effects-of-Payload-on-the-Fuel-Consumption-of-Trucks.pdf>>. Acesso em: 25 nov 2024 às 12h45.

DA SILVA, E. R.; TÔRRES, R. **THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF DIESEL/BIODIESEL BLENDS.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://abcm.org.br/anais/cobem/2013/PDF/1526.pdf>>. Acesso em: 16 dez 2024 às 14h22.

EPE. **Caderno de preços da geração.** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublishingImages/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao/CadernodePre%c3%a7osdeGera%c3%a7%c3%a3o_r0.pdf>. Acesso em: 25 nov 2024 às 09h35.

ERDOĞAN, S. **LHV and HHV prediction model using regression analysis with the help of bond energies for biodiesel**. *Fuel*, v. 301, p. 121065, out. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121065>>. Acesso em: 14 mar 2025 às 15h52.

ESTADÃO. **Caminhão a hidrogênio da GWM vem ao Brasil em 2025 para testes e busca de parcerias**. Disponível em: <<https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/caminhao-a-hidrogenio-da-gwm-vem-ao-brasil-em-2025-para-testes-e-busca-de-parcerias/>>. Acesso em: 28 mar 2025 às 14:39.

EUROPEAN HYDROGEN OBSERVATORY. **The European hydrogen market landscape**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2023-11/Report%2001%20-%20November%202023%20-%20The%20European%20hydrogen%20market%20landscape.pdf>>. Acesso em: 13 jan 2025 às 11h 22.

GIAKOUMIS, E. G. SARA KATSANIS, C. K. **Estimation of biodiesel cetane number, density, kinematic viscosity and heating values from its fatty acid weight composition**. *Fuel*, v. 222, p. 574–585, jun. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.187>>. Acesso em: 14 mar 2025 às 15h50.

GWM. **Long March 1 heavy-duty fuel cell truck price, endurance, and parameter configuration**. Disponível em: <<https://www.xczqc.com/item-2.html>>. Acesso em: 31 mar 2025 às 10h34.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. Nova York: Editora McGraw-Hill Education, 2018. 1056 p.

HYUNDAI. **Xcient | HYUNDAI Truck & Bus**. Disponível em: <<https://trucknbus.hyundai.com/global/en/products/truck/xcient/gallery-detail/exterior>>. Acesso em: 31 mar 2025 às 10h38.

IBM. **What Is the Levelized Cost of Energy (LCOE)?** Disponível em: <<https://www.ibm.com/think/topics/levelized-cost-of-energy>>. Acesso em 17 mar 2025 às 12h46.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Hydrogen Review**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>>. Acesso em: 14 nov 2024 às 10h12.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Transport**. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/transport>>. Acesso em: 14 nov 2024 às 10h35.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Trucks & Buses**. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/transport/trucks-and-buses>>. Acesso em: 14 nov 2024 às 10h48.

MANOHARAN, Y.; HOSSEINI, S. E.; BUTLER, B.; ALZHAHRANI, H.; SENIOR, B. T. F.; ASHURI, T.; KROHN, J. **Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect**. Applied Sciences, 4 jun. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app9112296>>. Acesso em: 14 mar 2025 às 15h05.

NIKOLA. **Nikola BEV - Battery-electric Semi-truck**. Disponível em: <<https://www.nikolamotor.com/tre-bev>>. Acesso em: 31 mar 2025 às 10h36.

OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. **Hydrogen Storage**. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>>. Acesso em: 16 dez 2024 às 11h10.

OPOKU, R. AHUNU, B.; AYETOR, G. K. K.; AYITEY, D. T.; UBA, F.; ASIEDU, N.; OBENG, G. Y. **Unlocking the potential of solar electric vehicles for post-COVID recovery and growth in the transport sector in Ghana**. Scientific African, v. 20, jul. 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01583>>. Acesso em: 14 mar 2025 às 15h41.

SAE. **J2601_202005: Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles**. Disponível em: <https://www.sae.org/standards/content/j2601_202005/>. Acesso em: 20 jan 2025 às 09h41.

SANTANA, L.; DOS SANTOS, G.; SANTOS, A.; MARINHO, C.; BISPO, A.; VILLARDI, H.; PESSOA, F. **Evaluating the economic influence of water sources on green hydrogen production: A cost analysis approach**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 89, p. 353–363, 28 set. 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.09.274>>. Acesso em: 14 mar 2025 às 15h37.

TANSINI, A.; ZACHAROF, N.; PRADO RUJAS, I.; FONTARAS, G. **Analysis of VECTO data for Heavy-Duty Vehicles (HDV) CO2 emission targets**. Publications Office of the European Union (2018). Disponível em: <<https://data.europa.eu/doi/10.2760/551250>>. Acesso em: 14 mar 2025 às 15h10.

TEXACO. **Tipos de caminhões: conheça os principais tamanhos e capacidades**. Disponível em: <<https://blog.texaco.com.br/ursa/tipos-de-caminhoes-e-capacidades/>>. Acesso em: 31 mar 2025 às 10:01.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. **Fundamentals of Classical Thermodynamics. 6th edition**. Detroit: Editora John Wiley & Sons, 2003. 816 p.

XU, Z.; DONG, W.; YANG, K.; ZHAO, Y.; HE, G. **Development of efficient hydrogen refueling station by process optimization and control**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 47, p. 23721–23730, 1 jul. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.158>>. Acesso em: 14 mar 2025 às 15h34.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio técnico e financeiro da Petrogal Brasil S.A. (Joint Venture Galp | Sinopec) e o fomento à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P,D&I) no Brasil concedido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPPI) para a execução deste projeto, intitulado “Avaliação técnico-científica de soluções para produção, armazenamento, transporte e consumo de hidrogênio verde, e seus impactos e oportunidades na cadeia de energia”, que resultou nesse artigo.