

Potencial de geração de hidrogênio verde e sua capacidade de suprir a frota de veículos leves e pesados no estado de Minas Gerais, Brasil

Vítor Brumano Andrade-Cardinali¹, Túlio Augusto Zucareli- de Souza², Luis Filipe de Almeida- Roque³, Roberto Berlini Rodrigues-da Costa⁴, Davi José Souza-Ferreira⁵, Paulo Henrique Melo-Santos⁶, Nelly Vanessa Pérez-Rangel⁷, Gustavo Vieira-Frez⁸, Gabriel Marques-Pinto⁹, Luís Pedro Vieira-Vidigal¹⁰, Christian Jeremi Rodriguez Coronado¹¹

¹GETEC, IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: vitorcardinali@unifei.edu.br

²GETEC, IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: tulio_zucareli@unifei.edu.br

³GETEC, IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: filipe_roque@unifei.edu.br

⁴GETEC, IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: robertoberlini@unifei.edu.br

⁵GETEC, IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: davijosousazaf@gmail.com

⁶GETEC, IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: paulohtsantos@unifei.edu.br

⁷GETEC, IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: d2021100182@unifei.edu.br

⁸GETEC, IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: gustavo.frez@cefet-rj.br

⁹GETEC, IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: gabrielmarquespinto@unifei.edu.br

¹⁰GETEC, IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: luis.vidigal@engenharia.ufjf.br

¹¹GETEC, IEM, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Email: christian@unifei.edu.br

Resumo

Este estudo avaliou o potencial de Minas Gerais, maior estado produtor de energia solar FV no Brasil, em utilizar hidrogênio verde (H2V) para abastecer veículos. Constatou-se que a energia solar atual do estado não é suficiente para suprir todos os automóveis com células a combustível ou caminhões com combustão 100% H2V. No entanto, o uso de uma mistura *dual-fuel*, com 5% de H2V e 95% de diesel, mostrou-se viável, podendo atender 35,45% da frota de caminhões de Minas Gerais. A pesquisa destaca que, embora o Brasil possua uma matriz energética limpa, ainda precisa aumentar a capacidade de geração de energia solar para atender à futura demanda por H2V, crucial para descarbonizar setores industriais e de transporte. Investimentos e políticas públicas são necessários para expandir a potência instalada de fontes energéticas limpas, viabilizando a transição energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Palavras-chave: hidrogênio; energia solar; *dual-fuel*; transporte; descarbonização.

Abstract

This study evaluated the potential of Minas Gerais, the largest producer of solar PV energy in Brazil, to use green hydrogen (H2V) for vehicle fueling. It found that the state's current solar energy capacity is insufficient to power all automobiles with fuel cells or trucks with 100% H2V combustion. However, the use of a dual-fuel mixture, with 5% H2V and 95% diesel, proved viable, capable of meeting 35.45% of the truck fleet in Minas Gerais. The research highlights that, despite Brazil's clean energy matrix, the country still needs to increase its solar energy capacity to meet the future demand for H2V, crucial for decarbonizing industrial and transportation sectors. Investments and public policies are required to expand the installed capacity of clean energy sources, enabling energy transition and reducing greenhouse gas emissions.

Keywords: hydrogen; solar energy; dual-fuel; transportation; decarbonization.

1. Introdução

O cenário mundial atual mostra uma crescente necessidade de zerar emissões de carbono, enquanto se observa um crescente uso energético. Neste contexto, soluções de descarbonização vêm sendo estudadas, podendo-se destacar aplicações no transporte. Segundo relatório *Net Zero Readiness Report 2023*, publicado

pela KPMG [1], o setor de transporte foi responsável por 16% das emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Por outro lado, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2023 [2], em 2022 o mesmo setor consumiu 29,5% da energia produzida, o que corresponde a $89,4 \times 10^6$ tep. Por outro lado, o país produziu $108,1 \times 10^6$ tep de petróleo e derivados, o que corresponde a 35,7% da produção energética, e

31,7*10⁶ tep de gás natural (11,1% da produção energética nacional).

Neste contexto, o uso do hidrogênio verde (H2V) no setor do transporte é discutido como uma alternativa para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Atualmente, a tecnologia mais desenvolvida para produzir H2V é por meio da eletrólise da água, havendo os eletrolisadores alcalino e de membrana polimérica de troca de prótons (tipo PEM) [3] como os modelos comercialmente disponíveis. Este processo possui a água como reagente e, com a injeção de energia elétrica advinda de fontes renováveis, a água é dissociada em hidrogênio (H2) e oxigênio (O2) [4], de modo que este hidrogênio seja considerado verde por ser produzido a partir de energia limpa e pelo fato de o processo não emitir gases de efeito estufa [5].

Neste sentido, acredita-se que, no futuro, veículos leves serão eletrificados (utilizando baterias ou células a combustível) [6], enquanto veículos pesados continuarão sendo à combustão, com motores de combustão interna tipo Diesel, possivelmente, no modo *dual-fuel*, com diesel (ou diesel renovável, HVO) e inserção de percentual de hidrogênio verde [7]. Em veículos leves, a célula combustível opera com o processo inverso à eletrólise, convertendo o hidrogênio e o oxigênio em energia elétrica e água. Para veículos pesados, uma tendência é utilizar o modo de operação em *dual-fuel*, que consiste em utilizar diferentes combustíveis a fim de atingir maior eficiência e/ou reduzir a emissão de gases de efeito estufa [8]. Neste contexto, utilizando *dual-fuel* de diesel e hidrogênio, o estudo de Pinto et al., 2023 [7] concluiu que o acréscimo de cerca de 28% de hidrogênio ao diesel aumenta a eficiência da combustão de 95,62% para 98,49%, além de reduzir a emissão de material particulado, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono. No entanto, o estudo mostrou um aumento na emissão de NOx.

Além disso, é importante destacar o conceito de *drop-in*, que consiste na substituição de combustíveis convencionais (diesel, gasolina, querosene) por biocombustíveis avançados, de modo que haja perfeita intercambialidade e, assim, não seja necessário realizar modificações no motor utilizado [9].

No que se refere ao estudo de cenários de utilização de veículos movidos a hidrogênio em escala regional e estadual, Abreu, 2022 [10] estudou o uso de hidrogênio produzido via energia eólica para suprir o transporte coletivo urbano de Fortaleza, no Brasil, e concluiu que seria necessário produzir 37.819,32 kg de hidrogênio por dia para suprir a frota da cidade. Outros estudos são referenciados por Jung et al., 2023 [11], os quais analisam o potencial energético do local e a partir disso, avaliam o potencial de produção de hidrogênio. Sapnken et al., 2024 [12] estudaram o potencial de uso deste combustível no transporte rodoviário de Camarões e concluíram que o sistema necessitaria entre 1,75 Mt e 2,5 Mt de hidrogênio por ano para

suprir sua demanda, o que reduziria as emissões em cerca de 26% (429 Mt equivalentes de CO2).

Ainda neste contexto, o estudo realizado por Obregón (2023) [13] analisou o cenário do México e concluiu que, em um cenário de zero emissões, a tendência é que serviços que usam caminhões sejam movidos pela combustão de 100% de hidrogênio. Por fim, o artigo publicado por Sapnken et al. (2023) [14] analisou o setor de transporte belga e ressaltou a importância da elaboração de políticas públicas para tornar o hidrogênio competitivo economicamente.

Diante dos estudos analisados, conclui-se que ainda não há na bibliografia estudos que analisam o potencial de utilização de hidrogênio como combustível em cenários consideráveis no Brasil. Neste sentido, este artigo se mostra inovador ao analisar a utilização do hidrogênio em diversos cenários no estado de Minas Gerais, maior produtor de energia solar centralizada [15] e segundo com maior frota de veículos [16] no Brasil, de modo a analisar a viabilidade, desafios e oportunidades deste novo cenário energético.

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2023 [2], em 2022 o Brasil produziu 30.126,5 GWh de energia por meio de usinas solares fotovoltaicas. Além disso, com base nos dados fornecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [15], o estado de Minas Gerais possui uma potência outorgada de 3,8165 GW em usinas fotovoltaicas.

No que se refere à frota brasileira de automóveis e caminhões, é possível verificar na Tabela 1, que se baseia nos dados sobre frota por tipo de veículo, da Secretaria Nacional de Trânsito Brasileira (SENATRAN) [16].

Tabela 1. Frota de veículos de Minas Gerais, por tipo e em relação ao total no Brasil, em 2024

	Minas Gerais	Relação ao total no país
Automóvel	7.190.958	11,62%
Caminhão	385.448	12,46%
Caminhão trator	102.360	11,42%

Fonte: SENATRAN, 2024

Segundo a Kelly Blue Book (KBB), empresa de avaliação de veículos e pesquisa automotiva reconhecida pelo mercado [17], um veículo de passeio médio percorre cerca de 11.700 km por ano no primeiro ano. No entanto, esta média pode reduzir ao passar do tempo. Além disso, dados sobre o Toyota Mirai, carro referência na utilização de célula combustível, mostram que são necessários 0,86 kg de hidrogênio para que este percorra 100 km [18]. Além disso, dados sobre o caminhão VW Meteor mostram que são necessários 67 kg de hidrogênio a 700 bar para se ter uma autonomia de 400 km [19]. Por fim, sabendo que um eletrolisador necessita em média de 50-60 kWh

para produzir 1 kg de hidrogênio [20], neste estudo será considerado 50 kWh.

2. Metodologia

Para atingir os objetivos descritos, este trabalho baseia-se na revisão da documentação de órgãos públicos brasileiros. Define-se potencial solar como sendo o potencial de gerar energia elétrica por meio de usinas solares fotovoltaicas e, para este cálculo, utilizou-se o portal da Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL para obter as usinas e suas respectivas potências e localidades e, para obter a Hora de Sol Pleno (HSP) em cada coordenada, utilizou-se os dados do Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito (CRESESB) [21].

Desta forma, com base na potência da usina e na HSP daquele local, é possível calcular a energia gerada por cada usina, e assim, compreender a energia total produzida por ano. Neste estudo, considerou-se que um mês possui 30 dias e, seguindo a referência dos principais softwares de simulação computacional na área, PVSyst [22] e PVSol [23], adotou-se uma perda global em sistemas fotovoltaicos de 23%. Além disso, utilizou-se a energia solar produzida no Brasil (30.126,5 GWh, segundo o BEN) para os cálculos.

Diante disso, sabendo a energia total produzida por ano, é possível calcular a quantidade de hidrogênio que seria produzida pelo total de usinas fotovoltaicas do estado de Minas Gerais, Brasil. Como a energia solar no Brasil é utilizada para suprir diversas demandas, considerou-se, para este artigo, cinco cenários, com 100, 20, 10, 5 e 2% de sua utilização para a produção de hidrogênio verde. Para este cálculo, utilizou-se a conversão mencionada anteriormente, em que um eletrolisador tipo PEM utiliza cerca de 50 kWh para produzir 1 kg de hidrogênio.

Além disso, para este estudo, serão consideradas três metodologias, sendo a primeira que considera os veículos leves, automóveis (ciclo Otto), utilizando célula combustível, a segunda que considera os veículos pesados, caminhões (ciclo Diesel), utilizando combustão de 100% do hidrogênio e a terceira que considera combustão no modo *dual-fuel* com 5% de H₂V e 95% de diesel. Para a frota de caminhões, considerou-se as categorias de caminhão e caminhão trator mencionadas na Tabela 1.

Para cada metodologia, são analisados três principais temas, sendo que o primeiro analisa quanto da frota do estado de Minas Gerais é possível suprir a partir da energia solar fotovoltaica produzida no Brasil (segundo dados do BEN), a segunda analisa a frota suprida a partir da mesma energia, mas produzida no estado de Minas Gerais (a partir dos dados da ANEEL) e o terceiro analisa quanto de energia e hidrogênio é necessário produzir para suprir a frota atual de cada tipo de veículo estudado.

2.1. Automóveis (célula de combustível)

Sabendo o potencial de geração de hidrogênio, é possível calcular a frota de veículos possível de ser atendida pela equação (1). Além disso, calculou-se a o percentual da frota suprida pela equação (2).

O cenário inverso também é analisado, considerando os pressupostos anteriores. Assim, partindo da quantidade de automóveis existentes segundo dados mapeados na Tabela 1, calcula-se quanto de hidrogênio, equação (3), e de energia, equação (4), devem ser produzidos para suprir esta frota.

$$N = \frac{(H * 100)}{(A * Ce)} \quad (1)$$

$$\%frota = \frac{N}{N_{total}} \quad (2)$$

$$H = \frac{(A * Ce * N)}{(100)} \quad (3)$$

$$E = Cel * H \quad (4)$$

Onde,

N – número de veículos abastecidos por hidrogênio

H – quantidade de hidrogênio produzido [kg]

A – quilômetros rodados por ano [km/ano/veículo]

Ce – consumo de combustível a cada 100km [kg/100km].

%frota – percentual da frota de veículos suprida

N_{total} – número total de veículos no estado

E – energia necessária para suprir a frota de veículos (kWh).

Cel – consumo de energia pelo eletrolisador [kWh/kgH₂]

Desta forma, considerando que um automóvel percorre 12.000 km por ano [17] e que um automóvel consome 0,86 kgH₂/100km (baseado no Toyota Mirai), calculou-se os parâmetros mencionados.

2.2. Caminhões (combustão do hidrogênio)

2.2.1. Combustão de 100% de hidrogênio verde

Para este cálculo, considerou-se os dados de caminhões e caminhões trator para o estado de Minas Gerais, conforme Tabela 1. Considerou-se o consumo específico de 16,75 kg/100km do modelo VW Meteor e que caminhões percorrem 100.000 km por ano [24]. A partir do potencial de geração de hidrogênio verde, aplicou-se a mesma metodologia utilizada para automóveis.

2.2.2. Combustão de 5% de hidrogênio verde e 95% de diesel convencional

A fim de obter os dados para calcular um cenário em que fosse utilizado 5% de hidrogênio verde em modo dual-fuel com 95% de diesel convencional, utilizou-se os dados do ensaio realizado por Pinto, 2024 [25] num motor de combustão interna de 6 cilindros, modelo FPT NEF 67. Este estudo faz parte do projeto do programa governamental brasileiro, chamado Rota2030, onde a UNIFEI executou o primeiro projeto relacionado ao uso de HVO e H2V em motores diesel, a partir de banco de ensaio dinamométrico. Assim, para a condição de operação a 2200 rpm e carga parcial (558 Nm), o consumo de diesel para um percentual energético de 5% de H2 foi de 28,84 kg/h. Dessa forma, considerando que a velocidade média de um caminhão é 80 km/h [26], é possível calcular o consumo específico de diesel (em massa), pela equação (5). Após isso, sendo o poder calorífico inferior (PCI) do diesel 45 MJ/kg [27] e o PCI do hidrogênio 120 MJ/kg [28], calcula-se a energia consumida utilizando diesel pela equação (6), a energia consumida utilizando hidrogênio pela equação (7) e, por fim, o consumo específico de hidrogênio (em massa) pela equação (8).

$$Ce_{diesel} = \frac{(C_{diesel})}{(V_{méd})} \quad (5)$$

$$E_{diesel} = PCI_{diesel} * Ce_{diesel} \quad (6)$$

$$E_{H2} = \frac{(E_{diesel} * \%H2)}{(1 - \%H2)} \quad (7)$$

$$Ce_{H2} = \frac{(E_{H2})}{(PCI_{H2})} \quad (8)$$

Onde,

Ce diesel – consumo específico de diesel [kg/km]

C diesel – consumo horário de diesel [kg/h]

V_{méd} – velocidade média do caminhão [km/h]

E diesel – energia consumida utilizando diesel [MJ/km]

PCI diesel – poder calorífico inferior do diesel [MJ/kg]

E H2 – energia consumida utilizando hidrogênio [MJ/km]

%H2 – percentual energético de hidrogênio utilizado

Ce H2 – consumo específico de hidrogênio [kg/km]

PCI H2 – poder calorífico inferior do hidrogênio [MJ/kg].

A partir da obtenção do consumo específico de hidrogênio no caminhão, utilizou-se as mesmas metodologias anteriores para calcular o número de caminhões e o percentual da frota suprida a partir da energia solar fotovoltaica atual disponível e a energia e o hidrogênio necessários para suprir toda a frota de caminhões do estado.

3. Resultados

Como resultado deste estudo, mapeou-se as usinas solares fotovoltaicas a partir de dados da ANEEL e encontrou-se a HSP de cada usina com base nas coordenadas geográficas, a partir do CRESESB (Tabela 2). A partir disso, calculou-se a energia produzida e a produção de hidrogênio totais no estado, conforme pode ser observado na Tabela 3. Esta mostra que o estado de Minas Gerais possui uma potência outorgada de 3,8165 GW, sendo capaz de produzir 7990,591 GWh de energia por ano. Nesta tabela, tem-se cinco cenários, os quais consideram o uso de 100, 20, 10, 5 e 2% da energia elétrica produzida para a produção de hidrogênio verde. Além disso, calculou-se a produção H2V a partir do potencial solar atual do Brasil, conforme se observa na Tabela 4.

Tabela 2 – Potência outorgada e HSP das usinas solares fotovoltaicas (UFV) no estado de Minas Gerais.

UFV de Minas Gerais	Potência outorgada (kW)	Hora de Sol Pleno (HSP)
AC III	39.496,00	5,90
AC IV	39.496,00	5,90
AC IX	29.622,00	5,90
AC V	39.496,00	5,90
AC VI	39.496,00	5,90
AC VII	39.496,00	5,90
AC VIII	39.496,00	5,90
AC X	39.496,00	5,90
AC XIX	39.496,00	5,90
AC XV	49.370,00	5,90
AC XVI	39.496,00	5,90
AC XVII	49.370,00	5,90
AC XVIII	39.496,00	5,90
AC XX	39.496,00	5,90
AC XXI	39.496,00	5,90
AC XXII	39.496,00	5,90
AC XXIII	39.496,00	5,90
ALGAR TECH	655,00	5,47
Araxá 1	45.000,00	5,38
Araxá 2	45.000,00	5,38
Automovel Clube de Teófilo Otoni	120,00	5,02
Central Mineirão	1.418,40	5,36
CENTRAL SOLAR ITACÁ III	750,00	5,26
Coletex	720,00	5,11
Coromandel 1	30.000,00	5,58
Coromandel 2	30.000,00	5,58
DOTTERMAN & DIAS	6,40	5,01
Fábio Botelho Notini I	4.975,00	5,32

FCR III Itapuranga	9.125,00	5,99
Francisco Sá 1	33.000,00	5,80
Francisco Sá 2	33.000,00	5,80
Francisco Sá 3	33.000,00	5,80
Guimarania 1	32.550,00	5,49
Guimarania 2	32.550,00	5,49
Hélio Valgas 1	50.000,00	5,82
Hélio Valgas 10	50.000,00	5,82
Hélio Valgas 2	50.000,00	5,82
Hélio Valgas 3	50.000,00	5,82
Hélio Valgas 4	50.000,00	5,82
Hélio Valgas 5	50.000,00	5,82
Hélio Valgas 6	50.000,00	5,82
Hélio Valgas 7	50.000,00	5,82
Hélio Valgas 8	50.000,00	5,82
Hélio Valgas 9	50.000,00	5,82
Instituto Nossa Senhora Das Graças	30,00	4,88
Ita 01	3.375,00	5,98
Ita 02	3.250,00	5,98
Jaíba 3	33.000,00	5,90
Jaíba 4	33.000,00	5,90
Jaíba 9	22.500,00	5,90
Jaíba SE1	40.000,00	5,90
Janaúba 1	50.000,00	5,84
Janaúba 10	50.000,00	5,84
Janaúba 11	50.000,00	5,84
Janaúba 12	50.000,00	5,84
Janaúba 13	50.000,00	5,84
Janaúba 14	50.000,00	5,84
Janaúba 15	50.000,00	5,84
Janaúba 16	50.000,00	5,84
Janaúba 17	50.000,00	5,84
Janaúba 18	50.000,00	5,84
Janaúba 19	50.000,00	5,84
Janaúba 2	50.000,00	5,84
Janaúba 20	50.000,00	5,84
Janaúba 3	50.000,00	5,84
Janaúba 4	50.000,00	5,84
Janaúba 5	50.000,00	5,84
Janaúba 6	50.000,00	5,84
Janaúba 7	50.000,00	5,84
Janaúba 8	50.000,00	5,84
Janaúba 9	50.000,00	5,84
Lar do Sol 1 (Antiga Leo Silveira 1)	49.500,00	5,87
Lar do Sol 10 (Antiga Leo Silveira 10)	49.500,00	5,87
Lar do Sol 2 (Antiga Léo Silveira 2)	49.500,00	5,87

Lar do Sol 3 (Antiga Leo Silveira 3)	49.500,00	5,87
Lar do Sol 4 (Antiga Leo Silveira 4)	49.500,00	5,87
Lar do Sol 5 (Antiga Leo Silveira 5)	49.500,00	5,87
Lar do Sol 6 (Antiga Leo Silveira 6)	49.500,00	5,87
Lar do Sol 7 (Antiga Leo Silveira 7)	49.500,00	5,87
Lar do Sol 8 (Antiga Leo Silveira 8)	49.500,00	5,87
Lar do Sol 9 (Antiga Leo Silveira 9)	49.500,00	5,87
Mourão	7,68	5,01
Nkg Stockler Aeroporto	775,00	5,11
Odaí Antonio Cenci	300,00	5,38
Paracatu 1	33.000,00	5,64
Paracatu 2	33.000,00	5,64
Paracatu 3	33.000,00	5,64
Paracatu 4	33.000,00	5,64
Petronas	30,00	5,37
Pirapora 10	31.000,00	5,87
Pirapora 2	31.000,00	5,87
Pirapora 3	31.000,00	5,87
Pirapora 4	31.000,00	5,87
Pirapora 5	31.000,00	5,87
Pirapora 6	31.000,00	5,87
Pirapora 7	31.000,00	5,87
Pirapora 9	31.000,00	5,87
POUSADA SAO RAFAEL	6,00	5,05
Racri	300,00	5,38
Rads Metalúrgica	555,00	5,40
São João 1	30.000,00	5,64
São João 2	30.000,00	5,64
São João 3	30.000,00	5,64
São João 4	30.000,00	5,64
São João 5	30.000,00	5,64
São João 6	30.000,00	5,64
São João 7	30.000,00	5,64
Somai	162,00	5,70
TESLA	37,20	5,36
Vazante 1	27.000,00	5,87
Vazante 2	27.000,00	5,87
Vazante 3	27.000,00	5,87

Fonte: elaboração própria, com base em dados da ANEEL e CRESESB.

Tabela 3. Produção de H2V em Minas Gerais para diferentes cenários

Potência total outorgada (MW)	3.816,50
Energia produzida (GWh/ano)	7.990,59
Energia produzida (EP) com 23% de perdas (GWh/ano)	6.152,76
Produção de H2V (kton/ano), utilizando 100% de EP	123,06
Produção de H2V (kton/ano), utilizando 20% de EP	24,61
Produção de H2V (kton/ano), utilizando 10% de EP	12,31
Produção de H2V (kton/ano), utilizando 5% de EP	6,15
Produção de H2V (kton/ano), utilizando 2% de EP	2,46

Fonte: elaboração própria

Tabela 4. Produção de H2V no Brasil para diferentes cenários

Energia produzida (EP) considerando perdas (GWh/ano)	30.126,462
Produção de H2V (kton/ano), utilizando 100% de EP	602,53
Produção de H2V (kton/ano), utilizando 20% de EP	120,51
Produção de H2V (kton/ano), utilizando 10% de EP	60,25
Produção de H2V (kton/ano), utilizando 5% de EP	30,13
Produção de H2V (kton/ano), utilizando 2% de EP	12,05

Fonte: elaboração própria

3.1. Automóveis (célula a combustível)

Com base nas considerações adotadas, é possível compreender quanto da frota de automóveis do estado de Minas Gerais é possível suprir de acordo com o percentual da energia elétrica produzida com a fonte solar no Brasil destinado à produção de H2 verde e, consequentemente, quanto de hidrogênio deve ser produzido em cada cenário, como é possível observar na Figura 1. Nela, tem-se no eixo esquerdo o percentual da frota de automóveis no estado suprida e, no eixo direito, a quantidade de hidrogênio verde que precisa ser produzida no Brasil, de acordo com o percentual de energia elétrica produzida a partir do sol no Brasil e destinado para este processo. A linha de tendência em

azul e sua equação estão relacionadas à frota de automóveis suprida.

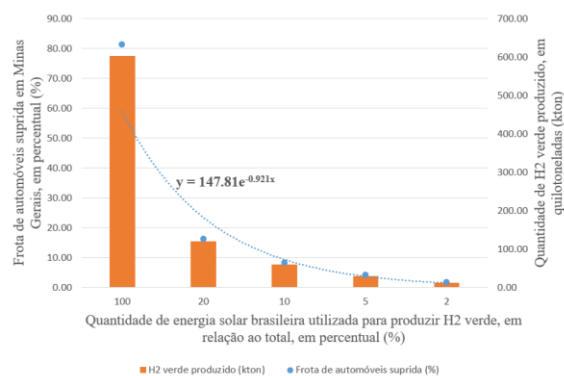


Figura 1. Gráfico da frota de automóveis suprida e da quantidade de hidrogênio verde produzida em função do percentual de energia elétrica a partir do sol no Brasil.

Fonte: elaboração própria.

Dessa forma, percebe-se que toda a energia elétrica produzida a partir do sol no país é capaz de suprir, no máximo, 81,19% da frota de automóveis do estado mineiro, isto é, 5.838.461 veículos. Além disso, realizou-se a mesma análise, mas considerando apenas o potencial solar de Minas Gerais, a qual pode ser observada na Figura 2. Para sua elaboração, foi seguida a mesma metodologia da Figura 1 e a única diferença é que a energia solar utilizada é apenas do estado de Minas Gerais, enquanto na primeira figura utilizou-se a energia produzida no Brasil.

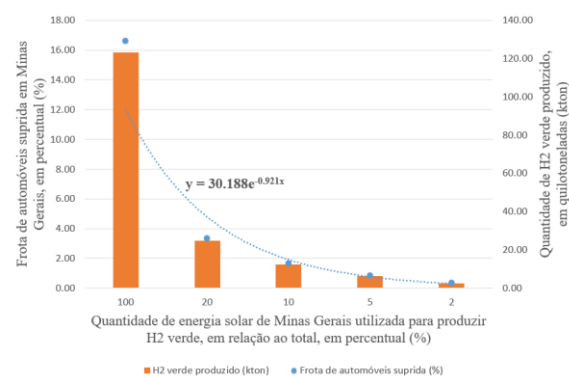


Figura 2. Gráfico do percentual da frota de automóveis no estado e da quantidade de hidrogênio verde em função do percentual de energia solar produzida em Minas.

Fonte: elaboração própria.

Com base nos dados da Figura 2, percebe-se que se o estado utilizasse todo o seu potencial solar para suprir a frota de automóveis, conseguiria suprir apenas 16,58% desta, o que equivale a 1.192.394 veículos. Assim, visando cenários em que 100, 20, 10, 5 e 2% dos automóveis utilizariam células a combustível, estudou-se quanto de hidrogênio verde e de energia

solar fotovoltaica seria necessário produzir para suprir esta demanda. Os resultados obtidos podem ser verificados na Figura 3, onde o eixo esquerdo representa a energia elétrica necessária a ser produzida e o eixo direito representa o hidrogênio necessário para suprir diferentes percentuais da frota de automóveis do estado de Minas Gerais. A linha de tendência em azul e sua equação estão relacionadas à energia elétrica necessária.

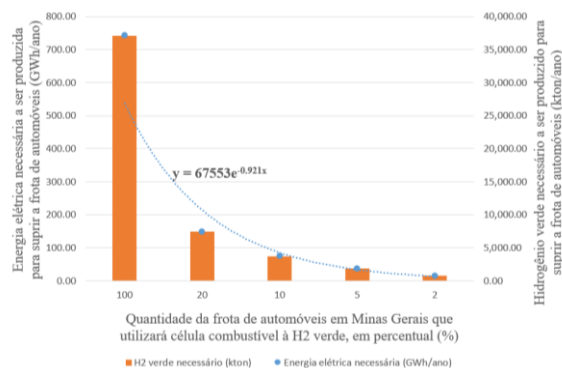


Figura 3. Gráfico da energia elétrica necessária e do hidrogênio necessário para suprir diferentes percentuais da frota de automóveis do estado de Minas Gerais

Fonte: elaboração própria.

Analisando este gráfico, nota-se que para suprir 100% da frota de veículos, seria necessário produzir 742,11 kton de hidrogênio verde, o que demandaria 37.105,34 GWh/ano de energia elétrica de usinas solares fotovoltaicas. Isso significa que o estado precisaria produzir mais 30.952,59 GWh/ano de energia solar fotovoltaica, o que significa aumentar a produção em 6 vezes.

3.2. Caminhões (combustão do hidrogênio)

3.2.1. Combustão de 100% de hidrogênio verde

A mesma metodologia realizada para automóveis foi realizada para os caminhões utilizando 100% de combustão do hidrogênio. Desta forma, a Figura 4 apresenta o percentual da frota do estado de Minas Gerais e a quantidade de hidrogênio verde produzida a partir dos mesmos 5 cenários de utilização da energia solar fotovoltaica produzida no Brasil para produção do H2 verde. Assim, utiliza a mesma metodologia do gráfico da Figura 1, diferenciando-se apenas em relação ao tipo de veículo.

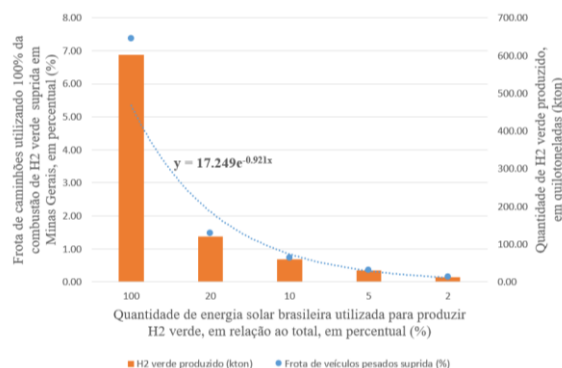


Figura 4. Gráfico da frota de caminhões com 100% de H2 verde e da quantidade de hidrogênio verde produzida em função do percentual de energia solar produzida no Brasil destinado para este processo.

Fonte: elaboração própria.

Assim, nota-se que toda a energia solar fotovoltaica produzida hoje no Brasil é capaz de suprir apenas 7,37% da frota de caminhões movidos a combustão de 100% de H2V, isto é, 35.971 veículos, e demanda a produção de 602,53 kton de H2 verde. Por outro lado, fazendo a mesma análise, mas considerando a energia produzida no estado de Minas Gerais, tem-se a Figura 5.

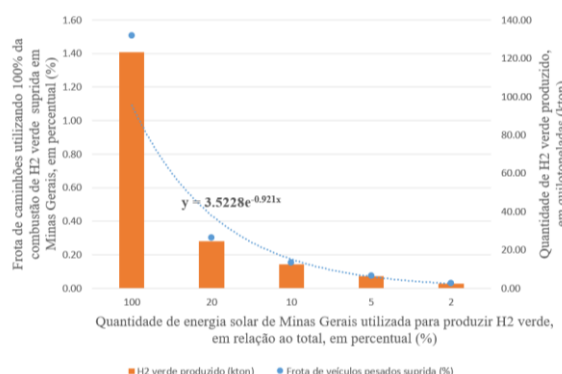


Figura 5. Gráfico da frota de caminhões movidos à combustão de 100% de H2 verde no estado e da quantidade de hidrogênio verde produzida em função do percentual de energia solar produzida em Minas Gerais.

Fonte: elaboração própria.

Dessa forma, nota-se que toda a energia solar fotovoltaica produzida neste estado é capaz de produzir 123,06 kton de H2 verde, o que permite suprir apenas 1,51% da frota analisada. Diante disso, a Figura 6 apresenta dados que mostram quanto hidrogênio verde é necessário para suprir para os mesmos 5 cenários já mencionados da frota do estado e quanta energia é necessária para isso, seguindo a mesma metodologia da Figura 3.

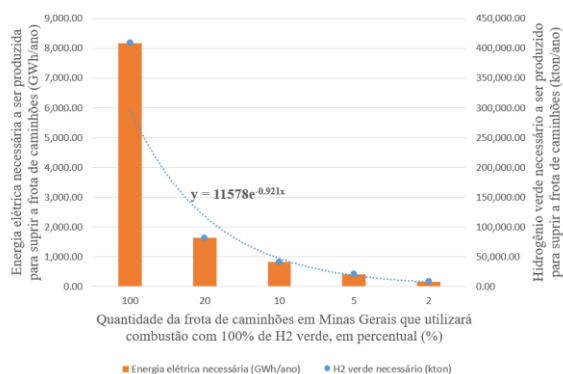


Figura 6. Gráfico da energia elétrica e do hidrogênio necessários para suprir diferentes cenários de frota de caminhões movidos à combustão de 100% de H2 verde.
Fonte: elaboração própria.

Com base nestes dados, tem-se que para suprir 100% desta frota, são necessários 8.170,8 kton de H2 verde, o que demanda uma energia elétrica de 408.539,2 GWh/ano produzida a partir de usinas solares fotovoltaicas. A fins comparativos, o estado de Minas Gerais precisaria produzir 402.386,44 GWh/ano de energia a mais do que atualmente, o que representa um aumento de 66,4 vezes.

3.2.2. Combustão de 5% de hidrogênio verde e 95% de diesel convencional

A partir da metodologia descrita, foram feitos os cálculos para o cenário onde os caminhões do estado de Minas Gerais fossem supridos com 5% de hidrogênio verde e 95% de diesel convencional, utilizando um regime de combustão *dual-fuel*, conforme se observa na Tabela 5.

Tabela 5. Consumo de hidrogênio calculado a partir de dados experimentais

Consumo específico de diesel em massa (kg/km)	0,36050
Energia consumida com diesel (MJ/km)	16,2225
Energia consumida com hidrogênio (MJ/km)	0,85382
Consumo específico de hidrogênio em massa (kg/km)	0,00712
Consumo específico de hidrogênio em massa (kg/100km)	0,71151

Fonte: elaboração própria

Desta forma, a Figura 7 apresenta a mesma metodologia da Figura 1 e relaciona a frota de caminhões supridos e a quantidade de hidrogênio produzido para os 5 diferentes cenários já mencionados. Com base neste gráfico, percebe-se que quando se utiliza o modo *dual-fuel* com 5% de

hidrogênio verde, a energia solar total produzida no Brasil é capaz de suprir 173,60% da frota do estado analisado, mas quando se analisa os cenários em que um menor percentual da energia solar é utilizado, a frota de caminhões não consegue ser totalmente suprida.

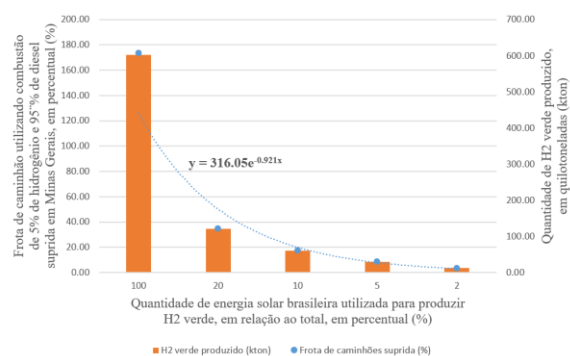


Figura 7. Gráfico da frota de caminhões com combustão *dual-fuel* de 5% de H2 verde e da quantidade de hidrogênio verde produzida (eixo direito) em função do percentual de energia solar produzida no Brasil destinado para este processo.
Fonte: elaboração própria.

Analisando a utilização da energia solar produzida no estado de Minas Gerais, a Figura 8 foi estruturada seguindo a metodologia da Figura 2 e mostra que num cenário em que 100% da energia solar fotovoltaica produzida neste estado é utilizada para produzir hidrogênio verde a ser utilizado em modo *dual-fuel*, apenas 35,45% da frota de caminhões é capaz de ser suprida.

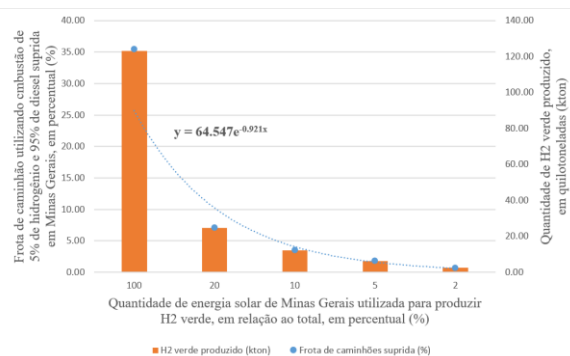


Figura 8. Gráfico da frota de caminhões com combustão *dual-fuel* de 5% de H2 verde no estado e da quantidade de hidrogênio verde produzida em função do percentual de energia solar produzida em Minas Gerais.
Fonte: elaboração própria.

Por fim, assim como na Figura 3, analisou-se quanto de energia solar fotovoltaica o estado estudado precisaria produzir para suprir toda a frota de caminhões, considerando os mesmos 5 cenários antes estudados. Desta forma, conforme se observa na Figura 9, para suprir toda a frota de caminhões do estado são necessários 347,08 kton de hidrogênio verde, que

demandam 17.354,09 GWh/ano de energia elétrica produzida a partir de usinas solares fotovoltaicas. Diante disso, o estado precisaria produzir 11.201,33 GWh/ano a mais de energia elétrica a partir do sol para suprir esta demanda, o que representa aumentar a produção em 2,82 vezes.

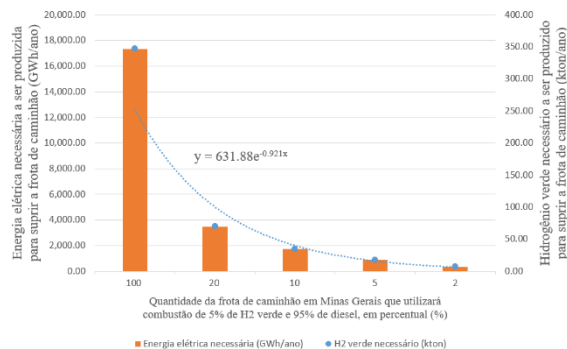


Figura 9. Gráfico da energia elétrica e do hidrogênio necessários para suprir cenários de frota de caminhões movidos à combustão de 5% de H2 verde e 95% de diesel. Fonte: elaboração própria.

4. Conclusões

Com base nos dados obtidos neste trabalho, conclui-se que o estado de Minas Gerais, sendo o maior produtor de energia solar FV no Brasil, ainda não possui capacidade de suprir um cenário em que todos os seus automóveis utilizem célula combustível ou todos os seus caminhões utilizem combustão com 100% de H2V. Por outro lado, conclui-se que no modo *dual-fuel*, quando se utiliza fração de 5% de hidrogênio em substituição de parte do diesel, a utilização do hidrogênio verde no transporte se torna mais viável, uma vez que a energia produzida a partir de usinas solares fotovoltaicas é capaz de suprir a demanda de caminhões do estado de Minas Gerais e a mesma energia produzida neste estado possui capacidade de suprir 35,45% desta frota.

Desta forma, no caso de veículos a combustão, uma alternativa para se reduzir as emissões e iniciar a transição energética no setor de transporte e a consequente descarbonização é utilizar o regime de combustão *dual-fuel* tratado neste artigo, uma vez que é utilizada uma menor quantidade de H2 verde, mas é possível reduzir drasticamente as emissões de gases de efeito estufa quando utilizado com biocombustíveis avançados e drop-in, como por exemplo, o farnesano (diesel verde, de cana de açúcar) e o HVO (diesel verde, de triglicéride) [7, 29].

Assim, este estudo é importante para entender que, por mais que o Brasil seja um dos países com a matriz energética mais limpa no mundo, ele ainda não é capaz de suprir demandas de um cenário onde a economia do hidrogênio é realidade. Assim, é preciso se preocupar com as fontes de geração de energia para produzir este combustível, pois, além do transporte, o hidrogênio é

cotado como principal responsável para a descarbonização de diversas indústrias, como, por exemplo, a de cimento, do aço, do vidro e de fertilizantes e, para suprir toda esta demanda, são necessários investimentos e políticas públicas para aumentar a potência instalada de fontes energéticas limpas.

5. Referências

- [1] About KPMG ESG 93 KPMG contacts 94. . [s.l: s.n.].
- [2] **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL BRAZILIAN ENERGY BALANCE.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.
- [3] ZHANG, J. et al. Life cycle assessment of three types of hydrogen production methods using solar energy. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 30, p. 14158–14168, 8 abr. 2022.
- [4] SHIVA KUMAR, S.; HIMABINDU, V. **Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review.** **Materials Science for Energy Technologies** KeAi Communications Co. 1 dez. 2019.
- [5] BAREISS, K. et al. Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems. **Applied Energy**, v. 237, p. 862–872, 1 mar. 2019.
- [6] DE SOUZA, T. A. Z. et al. Economic assessment of hydrogen and electricity cogeneration through steam reforming-SOFC system in the Brazilian biodiesel industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, 10 jan. 2021.
- [7] PINTO, G. M. et al. Combustion, performance and emission analyses of a CI engine operating with renewable diesel fuels (HVO/FARNESANE) under dual-fuel mode through hydrogen port injection. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 51, p. 19713–19732, 16 jun. 2023.
- [8] DA COSTA, R. B. R. et al. Experimental investigation on the potential of biogas/ethanol dual-fuel spark-ignition engine for power generation: Combustion, performance and pollutant emission analysis. **Applied Energy**, v. 261, 1 mar. 2020.
- [9] VELVIZHI, G. et al. Carbon credit reduction: A techno-economic analysis of “drop-in” fuel production. **Environmental Pollution** Elsevier Ltd, 1 jan. 2023b.
- [10] ABREU, H. **PROPOSTA DE APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE VIA ENERGIA EÓLICA**

NO TRANSPORTE COLETIVO URBANO DE FORTALEZA, FORTALEZA 2022. [s.l: s.n.].

[11] JUNG, C. et al. Fossil fuel reduction potential in Germany's transport sector by wind-to-hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 52, p. 23161–23167, 27 dez. 2018.

[12] SAPNKEN, F. E. et al. The potential of green hydrogen fuel as an alternative in Cameroon's road transport sector. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 49, p. 433–449, 2 jan. 2024.

[13] ROJAS OBREGÓN, A. et al. The role of hydrogen in a decarbonised future transport sector: A case study of Mexico. **Energy Reports**, v. 9, p. 26–31, 1 nov. 2023.

[14] SAPNKEN, F. E.; POSSO, F.; TAMBA, J. G. Hydrogen fuel and the Belgian transport sector: A critical assessment from an environmental and sustainable development perspective. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 73, p. 28247–28261, 26 ago. 2023.

[15] **Dados Abertos - Agência Nacional de Energia Elétrica.** Disponível em: <<https://dadosabertos.aneel.gov.br/>>

[16] **Estatísticas - Frota de Veículos - SENATRAN.** Disponível em: <<https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/estatisticas-frota-de-veiculos-senatran>>.

[17] **Brasileiros rodam em média 12,9 mil Km no primeiro ano de uso de um veículo.** Disponível em: <<https://www.kbb.com.br/detalhes-noticia/quanto-brasileiro-roda-carro-ano/?ID=1830>>.

[18] AKDAĞ, O. The operation and applicability to hydrogen fuel technology of green hydrogen production by water electrolysis using offshore wind power. **Journal of Cleaner Production**, v. 425, 1 nov. 2023.

[19] **Volkswagen Caminhões e Ônibus.** Disponível em: <<https://vwco.com.br/>>. Acesso em: 5 jun. 2024.

[20] BUTTLER, A.; SPLIETHOFF, H. **Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review.** **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 1 fev. 2018.

[21] **CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica.** Disponível em: <<https://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 5 jun. 2024.

[22] **PVSYST.** Disponível em: <<https://www.pvsyst.com/>>.

[23] GMBH, V. S. **PV*SOL – Take your solar installations to the next level of efficiency.** Disponível em: <<https://pvsol.software/en/>>.

[24] **Alternative Fuels Data Center: Maps and Data - Average Annual Vehicle Miles Traveled by Major Vehicle Category.** Disponível em: <<https://afdc.energy.gov/data/10309>>.

[25] Pinto, Gabriel M. **Estudo experimental do desempenho, combustão e emissões de um motor de ignição por compressão utilizando diesel verde (HVO) em modo dual-fuel com hidrogênio e gás natural. Aspectos técnicos e econômicos.** 2024. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2024.

[26] THIJSEN, R.; HOFMAN, T.; HAM, J. **Ecodriving acceptance: An experimental study on anticipation behavior of truck drivers.** **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, v. 22, p. 249–260, 2014.

[27] CATALUÑA, R. et al. Biodiesel glycerides from the soybean ethylic route incomplete conversion on the diesel engines combustion process. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 28, n. 12, p. 2447–2454, 1 dez. 2017.

[28] BETHOUX, O. Hydrogen fuel cell road vehicles: State of the art and perspectives. **Energies**, v. 13, n. 21, 1 nov. 2020.

[29] VELVIZHI, G. et al. **Carbon credit reduction: A techno-economic analysis of “drop-in” fuel production.** **Environmental Pollution**, 1 jan. 2023a.