



Technical Paper

Potencial de produção de hidrogênio via power-to-gas a partir de fonte eólica para mitigação de emissões de CO₂ em uma frota de ônibus no estado do Ceará

Hydrogen production potential by power-to-gas from a wind energy source to mitigate CO₂ emissions in a bus fleet in Ceará

Víctor Pimentel ¹ | Bruno Scola Lopes da Cunha ² | David Castelo Branco ³ | Sílvio Carlos Aníbal de Almeida ⁴.

1. UFRJ, DEM, . RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL, victorappimentel@poli.ufrj.br 2. PPE, PV PRH41, . RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL, slcunha.bruno@ppe.ufrj.br 3. PPE, COORDENADOR PRH41, . RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL, davidbranco@ppe.ufrj.br 4. UFRJ, DEM, . RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL, silvioa@gmail.com

Resumo

O mundo caminha em direção a uma transição energética visando reduzir as emissões dos gases de efeito estufa (GEE) ao mesmo tempo em que precisa atender a sua demanda energética. Para atender aos acordos climáticos e promover um desenvolvimento mais sustentável de suas cidades, os países buscam a redução da utilização dos combustíveis fósseis e o aumento da participação de tecnologias de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis em suas matrizes energéticas, utilizando-as de maneira complementar às usuais. Particularmente, a geração de energia eólica se destaca dentro do Brasil, com uma capacidade instalada de 17,2 GW (2020), sendo mais de 85% dessa capacidade correspondente à região Nordeste. Essa geração pode ser aplicada para a produção de hidrogênio via eletrólise da água, representando uma alternativa importante para a produção mais limpa desse combustível. Esse tipo de combustível é avaliado como uma importante opção tecnológica para alcançar a neutralidade nas emissões de carbono e cumprir com os acordos climáticos estabelecidos. O presente trabalho busca avaliar como a sua produção pode ser estimulada no Brasil e como ele pode ser utilizado no setor de transporte de passageiros a fim de contribuir para a redução das emissões, já que esse setor é um dos principais contribuintes dentro do país, excluindo os setores relacionados à agricultura e uso do solo.

Palavras-chave: Transição energética. Hidrogênio verde. Energia eólica. Redução de emissões de GEE. Setor de transportes

Abstract

The world is moving towards an energy transition aimed at reducing greenhouse gas (GHG) emissions at the same time that it needs to meet its energy demand. To meet climate agreements and promote a more sustainable development of their cities, countries seek to reduce the use of fossil fuels and increase the participation of electricity generation technologies from renewable sources in their energy matrices, using them in a complementary way to the usual ones. In particular, wind power generation stands out within Brazil, with an installed capacity of 17.2 GW (2020), with more than 85% of this capacity corresponding to the Northeast region. This generation can be applied to the production of hydrogen via water electrolysis, representing an important alternative for the cleaner production of this fuel. This type of fuel is evaluated as an important technological option to achieve neutrality in carbon emissions and comply with established climate agreements. The present work seeks to evaluate how its production can be stimulated in Brazil and how it can be used in the passenger transport sector in order to contribute to the reduction of emissions, since this sector is one of the main contributors within the country, excluding sectors related to agriculture and land use.

Keywords: Energy transition. Green hydrogen. Wind power. GEE emissions reduction. Transport sector

Received: October 07, 2021 | **Accepted:** | **Available online:**

Article n°:

Cite as: Proceedings of the Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2022>.

1. Introdução

Os desafios para o desenvolvimento sustentável da sociedade global no século 21 envolvem a geração de energia que consiga atender as demandas cada vez maiores, aliado ao desafio climático de manutenção da temperatura do planeta. De acordo com a Agência Internacional para Energias Renováveis (IRENA) (2018), as emissões de CO₂ devem diminuir caso seja adotado um cenário com aumento na geração de energia e potência a partir de energias renováveis, aumento da eficiência energética e utilização dessas fontes renováveis na eletrificação.

Em busca de uma neutralidade nas emissões de carbono o hidrogênio se apresenta como uma importante opção alternativa aos combustíveis fósseis, podendo ser transformado em eletricidade ou combustíveis sintéticos e ser utilizado com finalidades comerciais, industriais ou de mobilidade. De acordo com Housseini et al. (2019), os subprodutos das reações dentro das células de combustível (dispositivos que convertem a energia presente no gás hidrogênio em energia elétrica) são vapor d'água e calor, sendo vantajoso quando comparado às emissões de CO₂ e outros gases após a reação dentro dos motores de combustão interna.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) (2021), as fontes renováveis representam cerca de 84,8% da oferta interna de eletricidade na matriz energética brasileira, sendo esse percentual referente à soma da produção nacional e das importações. A participação da energia eólica dentro dessa oferta corresponde a aproximadamente 8,8%. Esse tipo de fonte pode ser utilizado para gerar a eletricidade necessária para a realização da eletrólise da água, podendo representar um importante papel no desenvolvimento das tecnologias de produção de hidrogênio no Brasil.

Para esse trabalho será avaliado uma planta de produção de hidrogênio via eletrólise da água a partir de uma fonte dedicada de energia eólica no litoral do estado do Ceará. O objetivo do trabalho será a avaliação da produção do hidrogênio via *power-to-gas* oriundo dos parques eólicos de Taíba (São Gonçalo do Amarante) e Prainha (Aquiraz) para aplicação em uma frota de 10 ônibus, a fim de se comparar o potencial de redução de emissões de CO₂.

2. Desenvolvimento

O local de estudo é o estado do Ceará, no Nordeste do Brasil. O estado possui a maior parte de suas usinas eólicas localizadas no litoral, se estendendo desde o município de Icapuí, na divisa com o Rio Grande do Norte, até o município de Camocim. De acordo com o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE) (2018), o estado possui 76 usinas eólicas com potência total de cerca de 2 GW, representando 47,5% da matriz energética estadual e é o terceiro na produção de energia eólica do país.

Os municípios escolhidos para análise foram: São Gonçalo do Amarante e Fortaleza, pertencentes ao litoral. A motivação para análise nessas localidades se dá pela escolha da capital, local com maior PIB per capita do estado e do Nordeste, de acordo com o Diário do Nordeste (2022), representando um importante polo econômico para a região.

Segundo a publicação no portal do Governo do Ceará (2022), o município de São Gonçalo do Amarante possui investimentos de cerca de R\$ 42 milhões para um projeto piloto de implantação de usina de hidrogênio verde no Complexo Industrial e Portuário do Pecém. O projeto prevê uma

unidade com capacidade de produção de 250 Nm³/h de hidrogênio e, portanto, é uma das localizações alvo do estudo.

Para o estudo atual, considerou-se uma frota reduzida de 10 veículos a fim de avaliar sua aplicação dentro de uma perspectiva de projeto piloto, condicionando sua expansão a eventuais análises de viabilidade tecnológica e financeira. Do ponto de vista da disponibilidade de energia elétrica para realização da eletrólise, dois parques eólicos localizados nos municípios acima foram escolhidos para comparação: Parque Eólico de Mucuripe (Fortaleza) e Parque Eólico de Taíba (São Gonçalo do Amarante).

No último atlas de energia elétrica publicado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2005), foi publicado que a potência nominal do Parque Eólico de Mucuripe é de 2,4 MW, sendo um parque *onshore* constituído de 4 turbinas Wobben E40/600 e operado pela Wobben Wind Power. Esse parque foi o primeiro empreendimento de geração energia eólica do estado em 1997.

O Parque Eólico de Taíba possui potência nominal de 5 MW, e foi o primeiro a atuar como produtor independente do país, sendo operado desde 1999. É composto por 10 turbinas de 500 kW Wobben E40/500 com rotores de 40 metros de diâmetro e também é operado pela Wobben Wind Power (ANEEL, 2005).

3. Metodologia

3.1. Cálculo da demanda de hidrogênio

O primeiro passo para analisar a produção de hidrogênio verde é identificar a demanda diária média de combustível para abastecimento dos ônibus. Para esse cálculo, determina-se o tamanho da frota N_f , o consumo de hidrogênio por quilômetro rodado C_j , e a rodagem diária média dessa frota K_{med} . Esse método foi estudado por Silva et al. (2012) e aplicado no estudo de Micena (2020) de acordo com a seguinte equação:

$$D_{H_2} = N_f \cdot C_j \cdot K_{med} \quad (1)$$

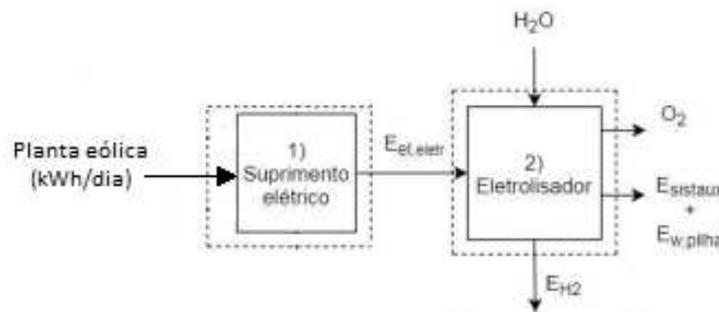
Sendo D_{H_2} a demanda diária de hidrogênio por parte da frota, ou seja, a quantidade necessária de hidrogênio [kg/dia] para suprir a necessidade de uma determinada rota. Apesar dos veículos serem abastecidos em momentos diferentes do dia, para esse estudo foi considerada uma demanda que não varia instantaneamente, ou seja, que não varia com o horário analisado.

3.2 Balanço de energia e de massa

Para calcular o consumo elétrico do eletrolisador, será utilizada uma abordagem de balanço de energia em um volume de controle composto por:

- Suprimento energético: Energia elétrica (kWh/dia) advinda da planta eólica dedicada para a produção;
- Eletrolisador: Composto por um conversor de correntes CA/CC, pela pilha eletrolítica e por sistemas auxiliares, melhor representado na Figura 1.

Figura 1 – Balanço de energia do problema analisado.



Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Micena (2020)

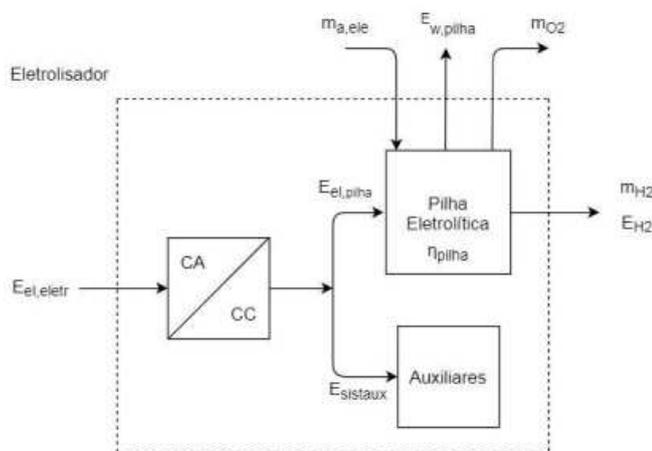
Para esse trabalho, assume-se que a energia elétrica gerada pela planta eólica terá uma parcela exclusiva para a produção do hidrogênio via eletrólise e terá relação direta com a demanda calculada acima. Além disso, será avaliado apenas o consumo energético para produção do combustível, não levando em conta os gastos energéticos para armazenamento, oriundos da compressão do gás e da sua refrigeração.

Do ponto de vista do volume de controle do eletrolisador, identificamos a entrada de água e de energia elétrica ($E_{el,eletr}$), com a saída de oxigênio gasoso, hidrogênio gasoso, representado em sua forma energética por E_{H2} e pelas perdas inerentes do sistema.

Essas perdas são consideradas devido a ineficiência da conversão de energia em trabalho na pilha eletrolítica conforme a 2ª Lei da Termodinâmica e são indicadas por $E_{w,pilha}$. Somadas a essas perdas, saem do volume de controle a energia gasta nos sistemas auxiliares ($E_{sistaux}$) para medição e purificação do hidrogênio.

Analisando apenas o eletrolisador, a Figura 2 representa o volume de controle aplicado no equipamento, com suas entradas e saídas de massa e energia.

Figura 2 – Balanço de energia e de massa no eletrolisador



Fonte: Adaptado de Kotowicz et al. (2017)

Conforme mencionado, o eletrolisador é composto por um elemento conversor de correntes alternadas em correntes contínuas, por onde passa inicialmente o fluxo de energia. Em seguida, esse fluxo se subdivide para a pilha eletrolítica ($E_{el,pilha}$) e para os sistemas auxiliares. Para o balanço de massa, entram no volume de controle apenas uma determinada massa de água ($m_{a,ele}$). Em contrapartida, saem do volume massa de oxigênio (m_{O_2}) e massa de hidrogênio (m_{H_2}).

Para o balanço energético, entra no volume de controle a energia elétrica fornecida para o eletrolisador ($E_{el,eletra}$) advinda do suprimento energético. O fluxo de saída do eletrolisador é composto pela perda de energia $E_{w,pilha}$ associada a eficiência energética da pilha η_{pilha} e pela saída de hidrogênio E_{H_2} .

Portanto, define-se o balanço energético no eletrolisador como:

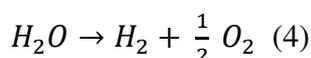
$$E_{el,eletra} = E_{sistaux} + E_{w,pilha} + E_{H_2} \quad (2)$$

Já o balanço de massa é definido como:

$$m_{a,ele} = m_{H_2} + m_{O_2} \quad (3)$$

A partir da equação 3, pode-se calcular com o auxílio das massas molares dos compostos, a vazão mássica de água necessária para o processo e também a vazão mássica de oxigênio obtida. Foram utilizadas as seguintes massas molares: água 18 g/mol, hidrogênio 2g/mol e oxigênio 32g/mol.

A partir da equação de reação da eletrólise (equação 4), encontra-se que para cada quilograma de hidrogênio produzido, é demandado 9 kg de água e é produzido 8kg de oxigênio. Esse oxigênio pode ser vendido posteriormente, reduzindo os custos de produção da planta.



Para iniciar a modelagem energética do problema, define-se que a eficiência de uma pilha eletrolítica, de acordo com Hosseini, Dincer e Rosen (2013), é calculada a partir da relação entre a potência entregue pela pilha na forma de gás de hidrogênio e a potência elétrica na entrada da pilha. Essa relação é apresentada na equação (5):

$$\eta_{pilha} = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot PCI_{H_2}}{\dot{E}_{el,pilha}} \quad (5)$$

Onde \dot{m}_{H_2} é a vazão mássica de hidrogênio [kg/h], PCI_{H_2} é o poder calorífico inferior do hidrogênio [kWh/kg] e $\dot{E}_{el,pilha}$ é a potência elétrica fornecida a pilha (oriunda do parque eólico).

O consumo de energia elétrica da pilha é calculado a partir da demanda de hidrogênio e da taxa de consumo elétrico na pilha (que é a potência elétrica fornecida a mesma, $\dot{E}_{el,pilha}$), conforme equação (6). Esse consumo será obtido a partir de um modelo comercial de eletrolisador.

$$E_{el,pilha} = D_{H_2} \cdot \dot{E}_{el,pilha} \quad (6)$$

A perda de energia envolvida no processo eletroquímico é calculada a partir da equação 7:

$$E_{w,pilha} = (1 - \eta_{pilha}) \cdot E_{el,pilha} \quad (7)$$

Segundo o estudo de Kotowicz et al. (2019), a energia elétrica consumida pelos sistemas auxiliares a pilha eletrolítica em eletrolisadores industriais corresponde a 10% da energia fornecida na entrada. O consumo restante corresponde ao desempenho da pilha eletrolítica e, portanto, o consumo final do eletrolisador pode ser calculado como:

$$E_{el,eletr} = \frac{E_{el,pilha}}{0,9} \quad (8)$$

A partir da Figura 2, percebe-se que a energia em forma de gás hidrogênio ao sair da pilha é calculada como:

$$E_{H_2} = E_{el,pilha} - E_{w,pilha} \quad (9)$$

A partir do balanço de energia definido acima, encontra-se o consumo energético dos sistemas auxiliares.

O tempo de operação diário do eletrolisador [h/dia] é calculado a partir da demanda diária média de hidrogênio e da vazão mássica de hidrogênio entregue pelo equipamento, conforme a equação:

$$t_{eletr} = \frac{D_{H_2}}{\dot{m}_{H_2}} \quad (10)$$

3.3 Consumo de energia dos parques eólicos

Para identificar o percentual de utilização da energia elétrica gerada no parque ($Util_{parque}$), é necessário calcular a quantidade de energia gerada [kWh/dia] durante o tempo de operação da usina de hidrogênio verde, a partir de sua capacidade instalada e do fator de capacidade do local, como pode ser visto na equação 11:

$$E_{eólica\ ger} = FC_{méd} \cdot Cap_{inst} \cdot t_{eletr} \quad (11)$$

E então, calcular a razão:

$$Util_{parque} = \frac{E_{el,eletr}}{E_{eólica\ ger}} \quad (12)$$

Com esse dado, será possível entender se o projeto se torna viável tecnologicamente, do ponto de vista de fornecimento de energia elétrica.

3.4 Análise de emissões

O objetivo deste tópico é avaliar o potencial de redução de emissões de gases que contribuem para o aquecimento global com a frota analisada. Será adotado que a redução na emissão será equivalente a quantidade de gases que seriam lançados na atmosfera pelos escapamentos dos ônibus caso esses utilizassem diesel como combustível. A redução ocorre quando se substitui o diesel pelo hidrogênio, que, conforme mencionado anteriormente, não contribui significativamente para emissões de GEE.

De acordo com o estudo de Oliveira (2011), o cálculo de emissão de poluentes a partir da utilização do diesel como combustível pode ser realizado a partir dos índices de emissão dos gases de efeito estufa. Esses índices são representados na Tabela 1 que relaciona o tipo de poluente com a quantidade gerada na queima do diesel [g/MJ]:

Tabela 1 – Índice de emissão dos gases de efeito estufa

Poluente	Diesel (g/MJ)
CO₂ (Gás carbônico)	74,0667
CH₄ (Metano)	0,00500
N₂O (Óxido nitroso)	0,00060

Fonte: Oliveira (2011)

A partir desses dados, calcula-se a emissão do poluente (t/ano):

$$E_{poluente} = \frac{C_{diesel} \cdot PCI_{diesel} \cdot E_{gás}}{10^9} \quad (13)$$

Onde $E_{poluente}$ é o total de emissão do poluente, C_{diesel} é o consumo anual de diesel [L/ano], PCI_{diesel} é o poder calorífico do diesel (38.376,21 MJ/m³) e $E_{gás}$ é o índice da tabela acima. O consumo de diesel anual é obtido a partir da equação 14:

$$C_{diesel} = \frac{K_{med} \cdot 365}{C_{diesel,ônibus} \cdot N_f} \quad (14)$$

Onde K_{med} e N_f foram definidas anteriormente e $C_{diesel,ônibus}$ é o consumo dos ônibus a diesel [km/L], dado por fabricantes.

4. Resultados

4.1. Análise da demanda de hidrogênio

Para o consumo de hidrogênio, foi utilizada a pesquisa de Miranda (2017), onde foi aplicado um protótipo de um veículo híbrido de hidrogênio verde e eletricidade para circulação na Ilha do Fundão, no Rio de Janeiro. O consumo encontrado no estudo foi de $0,067 \pm 0,006 \text{ kgH}_2/\text{km}$.

A rodagem diária média escolhida para o cálculo foi de 152 km/dia, seguindo o estudo realizado pela Confederação Nacional de Transportes (2017) sobre o perfil dos motoristas de ônibus urbanos. Sendo assim, a demanda diária média de hidrogênio seria de, aproximadamente, $101,84 \text{ kgH}_2/\text{dia}$.

4.2. Análise do eletrolisador

A análise no eletrolisador se baseou em um modelo comercial do tipo célula alcalina da Nel Hydrogen, pois apresenta uma boa eficiência energética, custos operacionais inferiores e tempo de vida superiores aos do tipo PEM. O modelo escolhido para análise foi o A150 e as suas especificações podem ser vistas na tabela abaixo:

Tabela 2 – Informações técnicas do eletrolisador

Fabricante	NEL Hydrogen
Modelo	Alcaline – A150
Taxa de produção do hidrogênio (kg/h)	13,5
Consumo elétrico da pilha (kWh/kg)	49,4

Pureza do hidrogênio (%)	99,9
Pureza do oxigênio (%)	99,5
Dimensões (m ²)	150
Tipo de eletrólito	Solução aquosa de KOH a 25%

Fonte: Catálogo comercial da Nel Hydrogen, modelo A150

Dessa forma, a vazão mássica de hidrogênio adotada foi de 13,5 kg/h e o consumo elétrico da pilha ($\dot{E}_{el,pilha}$) foi de 49,4 kWh/kg. A partir desses dados, e com o poder calorífico inferior de hidrogênio (120 MJ/kg, que equivale a 33,33 kWh/kg), a eficiência da pilha η_{pilha} foi de 67,5%.

A tabela 3 resume os resultados encontrados para a análise energética e de massa.

Tabela 3 – Resultados da análise energética

Variáveis do estudo	Sigla	Valor encontrado
Demanda diária de hidrogênio (kg/dia)	D_{H_2}	101,84
Eficiência da pilha	η_{pilha}	0,675
Energia elétrica consumida na pilha (kWh)	$E_{el,pilha}$	5030,90
Perda de energia da pilha (kWh)	$E_{w,pilha}$	1636,57
Energia na forma de gás H_2 (kWh)	E_{H_2}	3394,33
Energia consumida nos sistemas auxiliares (kWh)	$E_{sistaux}$	558,99
Tempo de operação diário (h)	t_{eletro}	7,54
Energia elétrica consumida no eletrolisador (kWh)	$E_{el,eletro}$	5589,88
Demanda diária média de água (L/dia)	D_{H_2O}	916,50
Produção diária média de O_2 (kg/dia)	P_{O_2}	814,72

Fonte: Elaboração própria

4.3. Análise dos parques eólicos:

De acordo com o último Boletim Mensal de Geração Eólica do Operador Nacional do Sistema Elétrico (NOS) (2021), o fator de capacidade médio ($FC_{méd}$) dos últimos 12 meses das usinas em questão foi de 48,9%.

Assume-se a hipótese de que o Fator de Capacidade será constante para o cálculo do consumo. Para se aproximar de um valor real, e melhorar o modelo, foi escolhido assumir o valor acima a partir da série histórica do último ano. A partir da capacidade instalada do parque eólico de Mucuripe (2,4 MW) e do fator de capacidade adotado, o resultado do total de energia eólica gerada durante o tempo de funcionamento da usina de hidrogênio $E_{eólica\ ger}$ foi de 8.853,29 kWh.

Dessa forma, o percentual de utilização do parque em relação a sua capacidade, calculado a partir da energia elétrica consumida no eletrolisador (5.589,88 kWh) foi de 63,1%.

De forma análoga, a partir da capacidade instalada do parque eólico de Taíba (5 MW), o resultado do total de energia eólica gerada durante o tempo de funcionamento da usina de hidrogênio $E_{eólica\ ger}$ foi de 18.444,36 kWh.

Portanto, o percentual de utilização do parque em relação a sua capacidade naturalmente foi menor, de cerca de 30,3%. Esse resultado era esperado tendo em vista a maior capacidade do parque de geração em relação ao parque de Mucuripe, já que possui mais turbinas em funcionamento.

4.4. Análise das emissões:

Por fim, a partir dos índices de emissões de gases do efeito estufa avaliados acima, é possível analisar o potencial de redução com essa frota. Inicialmente, no cálculo do consumo anual de diesel, adotou-se o consumo de diesel nos ônibus como 4,0 km/L. Esse valor foi adotado baseado em dados da SPTrans (2013) que levam em consideração o tráfego e as paradas constantes realizadas pelos veículos desse tipo que circulam em centros movimentados.

Portanto, o consumo anual de diesel para as condições acima definidas, foi de 138.700 litros. Aplicando a equação (13), as emissões de poluentes encontradas foram tabeladas:

Tabela 3 – Resultados da redução de emissões

Poluente	Emissão (t/ano)
CO₂ (Gás carbônico)	394,2408
CH₄ (Metano)	0,0027
N₂O (Óxido nitroso)	0,0032

Fonte: Elaboração própria

5. Considerações finais

A partir dos resultados acima, identifica-se que o modelo comercial de eletrolisador adotado consegue atender satisfatoriamente os requisitos técnicos do projeto, com um tempo de operação relativamente baixo. Do ponto de vista do consumo de energia dos parques eólicos, o parque de Taíba apresentou melhor condição de funcionamento em comparação ao parque de Mucuripe, sendo necessário um consumo inferior a 1/3 da capacidade de produção de energia elétrica.

Entretanto, é importante destacar que a pesquisa apresenta limitações relativas à simplificação da operação de um parque eólico. O estudo não leva em consideração todas as estratégias consideradas no planejamento da operação realizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Percebe-se que existe um baixo potencial de redução de emissão dos gases de efeito estufa perante o cenário de emissões nacional, mas que representa uma possibilidade de avanço na descarbonização do setor de transporte.

Como possíveis melhorias para estudos futuros, destaca-se a necessidade de considerar uma rota inteligente para o modal a fim de integrar o centro urbano a pontos específicos e estratégicos da cidade como universidades, hospitais ou até mesmo fazer conexões com outros modais.

Destaca-se também, a possibilidade de ampliação do estudo avaliando as estratégias de funcionamento operacional dos parques eólicos, aplicando suas consequências no modelo acima, bem como aplicações mais precisas dos fatores de capacidade dessas plantas.

6. Agradecimentos

Victor André Pinto Pimentel e Bruno Scola Lopes da Cunha agradecem o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-41/ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015.

Por fim, Víctor agradece aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRJ e aos professores do Programa de Planejamento Energético (PPE) da COPPE/UFRJ por todo conhecimento adquirido ao longo de sua formação.

Referências

- Atlas de energia elétrica do Brasil. (2005). ANEEL. ANEEL.
https://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2005_AtlasEnergiaEletricaBrasil2ed/06b7ec52-e2de-48e7-f8be-1a39c785fc8b
- Confederação Nacional do Transporte. (2017). *Pesquisa CNT Perfil dos Motoristas de Ônibus Urbanos*. Confederação Nacional do Transporte, CNT. [no](#)
- Empresa de Pesquisa Energética. (2021). *BEN 2021*. EPE.
- HOSSEINI. (2019). *Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect* MDPI.
- IPECE. (2018). *Panorama da produção de energia elétrica no Estado do Ceará: Um enfoque para a matriz eólica*. IPECE. [no](#)
- IRENA. (2018). *HYDROGEN FROM RENEWABLE POWER* IRENA.
- KOTOWICZ, J; BARTELA, Ł.; WEŁCEL, D.; DUBIEL, K. (2017). Hydrogen generator characteristics for storage of renewably-generated energy. *Energy, Amsterdam*, 118(1), 156–171. <https://doi.org/não informado>
- MICENA, R. P. (2020). *Estação de produção e abastecimento de hidrogênio solar: análise técnica e econômica*. UNESP. [no](#)
- OLIVEIRA, J.A. (2011). *Estimativa da emissão dos gases de efeito local – GEL´s de Efeito estufa – GEE´s da frota a diesel do sistema integrado de transportes de Fortaleza – SIT-FOR*. UFC.
http://www.cbtu.gov.br/estudos/pesquisa/antp_15congr/pdf/DU-025.pdf
- Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. (2021). *Boletim Mensal de Geração Eólica Agosto/2021*. Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. <http://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/acervo-digital/documentos-e-publicacoes?categoria=Boletim+Mensal+de+Gera%C3%A7%C3%A3o+E%C3%B3lica>
- SPTrans. (2013). *Estudos transporte da cidade de São Paulo*. SPTrans. <https://www.sptrans.com.br/>