

Produção de hidrogênio verde a partir de excedentes de parques eólicos no estado do Ceará – Brasil

Green hydrogen production from wind farm surplus in the state of Ceará – Brazil

Producción de hidrógeno verde a partir de parques eólicos excedentes en el estado de Ceará - Brasil

Recebido: 10/10/2024 | Revisado: 20/10/2024 | Aceitado: 21/10/2024 | Publicado: 24/10/2024

Allysson da Silva Pontes

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3876-9849>

Universidade Estadual do Ceará, Brasil

E-mail: alisondsp@hotmail.com

Alex Soares da Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4771-5076>

Secretaria da educação, Brasil

E-mail: alexsoares.lx@gmail.com

Natasha Esteves Batista

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9172-5098>

Universidade Federal do Ceará, Brasil

E-mail: estevesnatasha@gmail.com

Amanda Ferreira Sampaio

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6644-6959>

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil

E-mail: amandasampaio734@gmail.com

Elissandro Monteiro do Sacramento

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-7224>

Instituto Federal do Ceará, Brasil

E-mail: elissandro.monteiro@ifce.edu.br

Lutero Carmo de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7313-729X>

Universidade Estadual do Ceará, Brasil

E-mail: luterodelima@gmail.com

Resumo

A energia eólica, uma fonte renovável de energia elétrica cada vez mais difundida, enfrenta um desafio significativo: a variabilidade na geração causada pela intermitência dos padrões de vento. Essa intermitência é caracterizada não apenas por flutuações sazonais, mas também por variações diárias, impactando significativamente a capacidade de prever e dar suporte a um sistema elétrico usando essa fonte de energia. A intermitência diária é a principal razão para reduções na geração eólica, conhecidas como “curtailment” ou “constrained-off”. Essas reduções ocorrem quando há baixa demanda dentro do Sistema Interligado Nacional (SIN) ou quando a geração excede a capacidade de escoamento das linhas de transmissão. O objetivo deste estudo é demonstrar a viabilidade de converter o excesso de energia eólica, frequentemente desperdiçado por meio de reduções, em hidrogênio verde. Utilizando dados retirados de uma pesquisa a documentos da ONS. Ao usar uma fonte de energia primária existente, essa abordagem minimiza o investimento inicial necessário para a produção de combustível. O combustível fabricado pode então ser armazenado e usado durante períodos de baixa geração devido à intermitência do vento ou quando a demanda do sistema exigir. Os resultados indicam que somente em 2023, no estado do Ceará – Brasil, uma única usina eólica poderia ser produzida mais 2.000 toneladas de hidrogênio verde, utilizando energia que, de outra forma, seria desperdiçada.

Palavras-chave: Restrição de geração; Hidrogênio verde; Geração eólica; Redução de geração; Estado do Ceará; Brasil.

Abstract

Wind power, an increasingly widespread renewable source of electrical energy, faces a significant challenge: the variability in generation caused by the intermittency of wind patterns. This intermittency is characterized not only by seasonal fluctuations but also by daily variations, significantly impacting the ability to predict and support an electrical system using this energy source. Daily intermittency is the main reason for reductions in wind generation, known as “curtailment” or “constrained-off”. These reductions occur when there is low demand within the National Interconnected System (SIN) or when generation exceeds the throughput capacity of transmission lines. The objective of this study is to demonstrate the feasibility of converting excess wind energy, often wasted through curtailments, into green hydrogen. Using data taken from a survey of ONS documents. By using an existing primary energy source, this approach minimizes the initial investment required for fuel production. The manufactured fuel can then be stored and

used during periods of low generation due to wind intermittency or when system demand requires it. The results indicate that in 2023 alone, in the state of Ceará – Brazil, a single wind farm could produce over 2,000 tons of green hydrogen, using energy that would otherwise be wasted.

Keywords: Generation curtailment; Green hydrogen; Wind generation; Generation constraint; Ceará state; Brazil.

Resumen

La energía eólica, una fuente de energía eléctrica renovable cada vez más extendida, se enfrenta a un desafío importante: la variabilidad en la generación causada por la intermitencia de los patrones del viento. Esta intermitencia se caracteriza no sólo por fluctuaciones estacionales sino también por variaciones diarias, lo que impacta significativamente la capacidad de predecir y soportar un sistema eléctrico que utiliza esta fuente de energía. La intermitencia diaria es el principal motivo de las reducciones en la generación eólica, conocidas como “curtailment” o “constrained-off”. Estas reducciones ocurren cuando hay baja demanda dentro del Sistema Interconectado Nacional (SIN) o cuando la generación excede la capacidad de flujo de las líneas de transmisión. El objetivo de este estudio es demostrar la viabilidad de convertir el exceso de energía eólica, a menudo desperdiciado por restricciones, en hidrógeno verde. Utilizando datos extraídos de una búsqueda de documentos del ONS. Al utilizar una fuente de energía primaria existente, este enfoque minimiza la inversión inicial necesaria para la producción de combustible. El combustible fabricado puede luego almacenarse y utilizarse durante periodos de baja generación debido a la intermitencia del viento o cuando la demanda del sistema lo requiera. Los resultados indican que sólo en 2023, en el estado de Ceará – Brasil, un solo parque eólico podría producir 2.000 toneladas adicionales de hidrógeno verde, utilizando energía que de otro modo se desperdiciaría.

Palabras clave: Restricción de generación; Hidrógeno verde; Generación eólica; Reducción de generación; Estado de Ceará; Brasil.

1. Introdução

O aumento exponencial no consumo de energia nos últimos séculos foi impulsionado principalmente pelo crescimento populacional e pela proliferação de novas tecnologias. Apesar da implementação de planos de eficiência energética mais eficazes e dos avanços em equipamentos elétricos, essas medidas não conseguiram acompanhar, muito menos reduzir, a crescente demanda por energia elétrica. Atualmente, os combustíveis fósseis continuam sendo as fontes de energia predominantes, que contribuem significativamente para o aquecimento global (Bizerra et al., 2018). A alta demanda por combustíveis fósseis pode levar à escassez destes recursos, e sua extração e processamento têm impactos ambientais significativos. Consequentemente, a transição para fontes de energia renováveis é crucial. Considerando essa situação global, priorizar investimentos no desenvolvimento e implantação de energias renováveis é essencial. Essas fontes desempenharão um papel crítico no estabelecimento de uma matriz energética ecologicamente sustentável, reduzindo significativamente a dependência de combustíveis fósseis e mitigando seus impactos ambientais. Entre as várias opções renováveis, a energia eólica e fotovoltaica experimentou um crescimento notável nas últimas décadas, ultrapassando outras formas renováveis, como heliotérmica, geotérmica e biomassa (Dupont et al., 2015).

Tanto a energia eólica quanto a solar são recursos inesgotáveis com impactos ambientais significativamente menores em comparação às fontes de energia tradicionais. A geração de eletricidade a partir do vento e da luz solar não apenas ajuda a mitigar as mudanças climáticas, mas também afeta minimamente os ecossistemas, facilitando uma transição energética sustentável. No entanto, a intermitência dessas fontes continua sendo um dos principais desafios para sua implementação efetiva (Gaetano et al., 2023). Flutuações diárias, mensais e anuais na disponibilidade de energia eólica e solar exigem soluções urgentes e inovadoras para garantir um fornecimento de energia estável, confiável e consistente. Isso exige esforços contínuos de pesquisa e desenvolvimento para criar tecnologias de armazenamento de energia eficientes e sustentáveis.

A geração eólica continua a ser prejudicada pela falta de previsibilidade confiável do vento (Jordi et al., 2023). Além disso, a geração fotovoltaica possui uma divergência entre o horário de geração com os horários de pico de demanda no Brasil, que ocorrem entre 18h e 21h. Esses fatores comprometem a confiabilidade dessas fontes como o principal suprimento para um sistema elétrico. Nesse contexto, a necessidade de armazenar energia excedente se torna evidente (Serra et al., 2016; Chen et al., 2009). Numerosas soluções de armazenamento, como baterias e sistemas de armazenamento bombeado, são essenciais para

superar os desafios da intermitência e garantir um fornecimento confiável de eletricidade, mesmo em regiões onde as condições climáticas são notavelmente instáveis e severas.

Uma solução particularmente promissora e inovadora para gerenciar o excedente de energia elétrica é sua conversão em hidrogênio. Essa abordagem oferece um meio prático e versátil de armazenamento de energia, fornecendo uma alternativa viável durante períodos de baixa geração de fontes eólica e fotovoltaica, como o período noturno. Quando produzido a partir de energias alternativas, como energia eólica, fotovoltaica entre outras, o hidrogênio é considerado verde e se destaca no cenário das energias renováveis, consolidando seu papel como uma opção estratégica e se distinguindo de outras formas de armazenamento de energia (Kovač et al., 2021; Lebrouhi et al., 2022).

Consequentemente, o atual debate no mundo atualmente é a utilização do hidrogênio verde (H₂) tanto para armazenamento de energia como para transporte (Marchenko et al., 2017). Numerosos estudos estão a investigar o potencial de reutilização das infraestruturas existentes de gasodutos de gás natural para o transporte de hidrogênio (Patricio et al., 2012; Tlili et al., 2019). Tais adaptações poderiam reduzir significativamente o custo final do hidrogênio, aumentando sua viabilidade econômica.

O aproveitamento do gás só é possível após a eletrólise da água, separando-a do oxigênio (Rashid et al., 2015). Por ser um insumo muito importante para a vida, o ideal seria utilizar a água do oceano para a geração gás, restando água potável para consumo humano e animal. O H₂ pode ser uma alternativa para armazenamento de energia, o que atualmente é feito por baterias, que devido ao material causam grande impacto ao meio ambiente quando descartadas. Neste caso, o hidrogênio se diferencia das baterias, pois pode ser utilizado como combustível, aquecimento residencial, geração de energia elétrica por usinas termoeletricas ou células a combustível, e para transporte automotivo (Veziroğlu et al., 2008).

O H₂ poderia se tornar uma alternativa para a intermitência dessas matrizes, pois quando for necessário reduzir a geração por baixa demanda no consumo de energia elétrica ou inviabilidade de transmissão, o excedente seria utilizado para gerar hidrogênio. Resultando, assim, no aumento da participação de energias renováveis na matriz energética, reduzindo o uso de combustíveis fósseis na geração de energia elétrica, além de ser uma forte opção para a descarbonização da matriz energética global.

O principal objetivo do presente artigo é demonstrar quanto hidrogênio verde poderia ser produzido a partir do potencial eólico desperdiçado em uma usina de energia no estado do Ceará – Brasil.

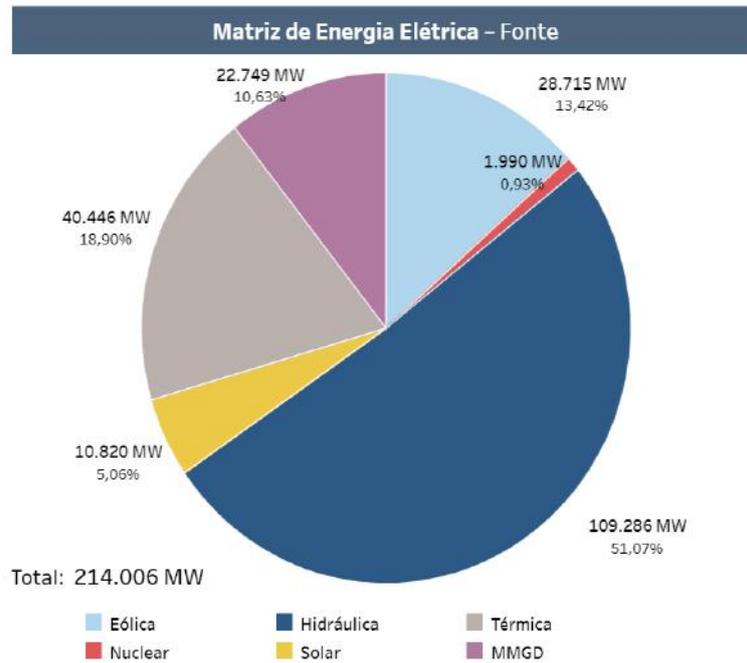
2. Metodologia

Foi realizado um levantamento de dados de geração e corte de parques eólicos localizados no estado do Ceará no ano de 2023 em documentos disponibilizados pela NOS (ONS, 2024). Após uma análise, foi escolhido para este trabalho aquele com maior redução de geração. Isso dá uma ideia do quanto a geração eólica ainda pode contribuir para o desenvolvimento do estado e da matriz brasileira, reduzindo ainda mais o uso de fontes não renováveis.

2.1 Recurso Eólico

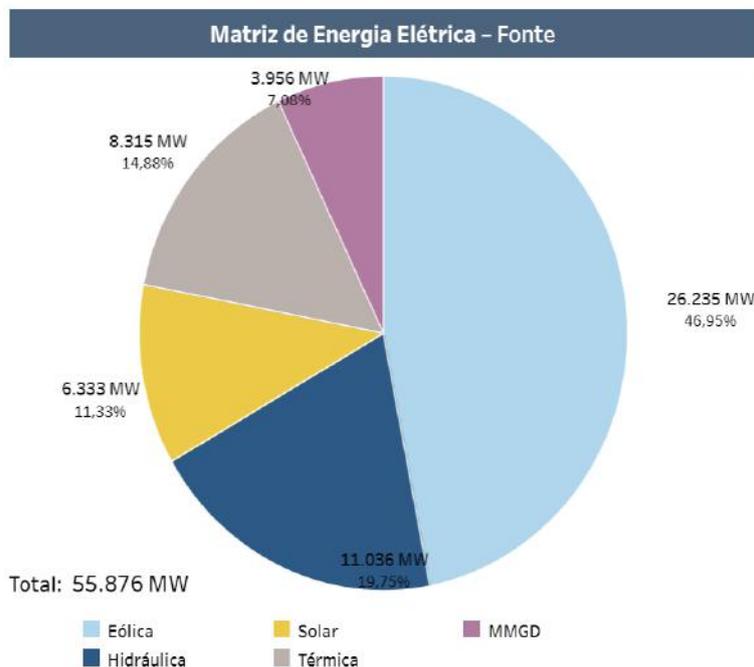
Com foco apenas na geração eólica, a terceira maior matriz brasileira considerando usinas centralizadas, atrás apenas das hidráulicas e térmicas. Em 2023, a energia eólica representou pouco mais de 13% da matriz brasileira, conforme mostra o Gráfico 1. Ressaltando seu caráter bastante incerto e sazonal, poderíamos mensurar que sua contribuição poderia ser ainda maior. No Gráfico 2, em relação ao subsistema Nordeste, região onde se localiza o estado do Ceará, a energia eólica responde por quase metade de toda a geração de energia elétrica da região, totalizando uma parcela de 46,95%, demonstrando a alta capacidade de geração da matriz na região Nordeste. Em números, o nordeste brasileiro possui uma capacidade instalada de pouco mais de 26 GW em energia eólica, sendo a maioria, esmagadoramente, em relação ao cenário nacional de 28.715 GW (ONS, 2023).

Gráfico 1.



Fonte: ONS – Sistema Nacional de Numeração (ONS, 2023).

Gráfico 2.



Fonte: ONS – Sistema em números Sub-sistema Nordeste (ONS, 2023).

Em ambos os gráficos, quando “solar” é mencionado, ele se refere apenas a usinas solares conectadas diretamente à rede básica com capacidade instalada mínima de 5 MW. Enquanto MMDG se refere à mini e micro geração distribuída, elas incluem pequenas e médias usinas fotovoltaicas, de até 5 MW, e pequenos geradores eólicos e hidráulicos. No entanto, o site não fornece informações sobre a participação de cada modalidade no MMDG.

Devido aos diferentes padrões climáticos, as usinas localizadas no Nordeste foram divididas em litoral e interiores do

continente, tendo diferentes perfis de geração. Os parques eólicos localizados no interior têm maior geração pela manhã e pela madrugada, enquanto os parques eólicos localizados no litoral têm maior perfil de geração durante o dia e a noite. As usinas eólicas instaladas no continente, em um raio de até 30 km da costa e em altitudes não superiores a 100 metros acima do nível do mar, foram classificadas como litoral. As demais foram classificadas como Interiores (ONS, 2023).

A parcela de energia gerada pelos ventos no Nordeste em comparação ao país demonstra todo o potencial da região para esse tipo de geração. Pelo mesmo motivo, todo investimento na região se justifica. Armazenar o potencial excedente dessa matriz em hidrogênio verde poderia trazer maior confiança para a matriz, pois poderia ser utilizado para garantir linearidade na geração eólica. Por exemplo, em épocas de baixa geração devido à variação dos ventos, a diferença de energia poderia ser suprida por H₂, trazendo um suprimento energético mais linear e maior confiabilidade nos parques eólicos, fazendo com que o hidrogênio compensasse as deficiências da fonte primária (Veziroğlu et al., 2008) e a demanda contratada da usina fosse atendida. Dessa forma, poderia evitar que os parques eólicos fossem os primeiros a receber ordens para reduzir a geração de energia, como ocorre atualmente. No final, a parcela de energia renovável na matriz nacional seria ainda maior.

A região nordeste brasileira é bem localizada para a produção de energia eólica, como demonstrado pela grande diferença de geração da região em relação ao restante do país. Aproveitando essa posição geográfica e com uma faixa litorânea de 573 km, o Ceará possui um alto potencial eólico para geração de energia elétrica que pode chegar a 35 GW (Esteves et al., 2015). No entanto, há apenas 2,32 GW de potência instalada no estado até o final de 2023 com um total de 53 usinas em operação comercial (ONS, 2024).

Estudos realizados em diferentes localidades do estado têm demonstrado que áreas litorâneas apresentam velocidades médias de vento acima de 10 m/s e em áreas montanhosas acima de 8 m/s (Camelo et al., 2008) justificando investimentos no estado.

A geração offshore começou a ser uma alternativa, alguns estudos já foram realizados e demonstraram um bom desempenho do estado para geração no modo com ventos atingindo 8 m/s e densidade de potência maior que 720 W/m² (Lima et al., 2020).

3. Resultados e Discussão

3.1 Produção de H₂

Neste artigo, serão coletados todos os dados reais de geração e redução de geração por baixa demanda do sistema de um parque eólico específico já em operação no estado do Ceará durante o ano de 2023. Essa redução de geração ocorre quando as matrizes energéticas estão gerando mais energia do que está sendo consumida no país ou quando há restrição de transmissão, que é quando as linhas de transmissão não têm capacidade para escoar a energia produzida. Com esses dados, será calculado o potencial energético desperdiçado e então mensurado quanto hidrogênio verde poderia ter sido fabricado, caso o excesso de energia tivesse sido direcionado para essa finalidade.

No site do ONS (ONS, 2024), temos acesso a planilhas com os dados necessários desde 2021, para cada mês. Para a realização deste trabalho, foi escolhido o ano de 2023, por ser o ano mais recente com dados completos. Abaixo veremos a Quadro 1 com uma compilação das gerações e cortes mensais, em MW, de uma usina localizada no estado do Ceará denominada Conjunto Trairi, além de sua somatória anual. O ONS não fornece o nome da cidade onde a usina está localizada.

Então, foi realizado um levantamento dos doze meses do ano de 2023, contabilizando os cortes de geração e demanda de cada usina do estado do Ceará e foi verificada a usina com maior perda anual. Com esses dados foi construída a Quadro 1.

Nesta mesma página temos acesso a um arquivo chamado “Dicionário de Dados” com as legendas necessárias para o entendimento das planilhas. A tabela foi criada a partir do download de planilhas mensais disponibilizadas no site acima citado, em cada um dos doze meses foram filtradas apenas as usinas do estado do Ceará, após isso foi escolhida a usina com maior

redução em termos de energia em MW, para por fim, a soma anual do corte foi convertida em quilogramas de hidrogênio.

Quadro 1 - Geração e corte mensal em MW.

CONJUNTO. TRAIRÍ		
Meses	Modalidade	MW
Janeiro	Geração	104.736,41
	Corte	1237,37
Fevereiro	Geração	74.626,66
	Corte	0,00
Março	Geração	49.487,76
	Corte	4.562,46
abril	Geração	34.956,75
	Corte	1.966,02
Maio	Geração	55.879,79
	Corte	829,32
Junho	Geração	69.043,38
	Corte	6.938,05
Julho	Geração	126.201,59
	Corte	9.975,77
Agosto	Geração	119.136,88
	Corte	21.539,32
Setembro	Geração	95.976,08
	Corte	29.765,97
Outubro	Geração	161.599,66
	Corte	12.349,30
Novembro	Geração	145.640,65
	Corte	8.024,88
Dezembro	Geração	144.061,29
	Corte	14.018,75
Anual	Geração	1.181.346,88
	Corte	111.207,19
	H2V (kg)	2.021.948,89

Fontes: ONS, dados de restrição de operação com restrição (ONS, 2024).

Considerando que para gerar cada kg de H₂ são necessários 55 kWh de energia elétrica, somente com esta usina eólica teríamos uma geração de mais 2.000 toneladas de hidrogênio verde. Com um investimento inicial somente na parte de geração de hidrogênio, pois a usina está em plena operação. Caso o hidrogênio seja utilizado para gerar energia elétrica utilizando conversão química, ela seria posteriormente escoada pela própria rede do parque eólico. Utilizando o mesmo procedimento, mas em relação ao ano de 2022, a usina teria fabricado cerca de 127 toneladas de hidrogênio verde utilizando seus 6985,75 MWh de energia elétrica desperdiçados devido à redução da geração.

O ONS admite três motivos para corte de geração, são eles: CNF – Motivo de atendimento aos requisitos de confiabilidade, ocorre quando a geração é maior do que a rede pode escoar com segurança. NE – Razão de energia, ocorre quando a demanda por energia é menor que a geração. REL – Motivo de indisponibilidade externa (elétrica), ocorre devido à indisponibilidade de instalações externas à usina que não estão incluídas nos motivos anteriores (ANEEL, 2024).

3.2 Geração de energia a partir de H2

Na queima para produzir energia térmica, mecânica ou elétrica, o hidrogênio chega a ser 39% mais eficiente que combustíveis fósseis (Veziroğlu et al., 2008), mas nas conversões há perdas, já que são necessários 55 kWh de energia para produção e ele só tem entre 33,3 kWh e 39 kWh de energia por quilo, não fazendo sentido utilizar essas usinas somente para fabricação de combustível como vetor energético, então o ideal seria fabricar utilizando somente o excedente não utilizado diretamente na geração de energia elétrica. A tonelada de hidrogênio verde de 2022 gerada a partir do excedente da usina seria convertida em pelo menos 67330,9 MW h de energia. Portanto, 60,14% da energia que seria desperdiçada seria aproveitada.

3.3 Uso da água

O maior obstáculo na fabricação do H2 por eletrólise é o uso da própria água. Por ser uma matéria-prima de alto valor para a manutenção da vida, a água é o único insumo para a fabricação do hidrogênio neste procedimento. O uso da água do mar é uma alternativa para a fabricação do combustível, mas além da necessidade de destilação, há a necessidade de dessalinização, o que onera a produção de gás. Além disso, deve-se levar em conta os resíduos gerados pela dessalinização e o custo do seu descarte.

A reciclagem de água seria uma forma de reduzir esse impacto, o que nos leva a utilizar o combustível nos próprios parques eólicos para gerar eletricidade, já que um dos subprodutos da geração de energia pelo H2V é a própria água (Gaetano et al., 2023; Veziroğlu et al., 2008). Na usina ela poderia ser mais facilmente canalizada e reutilizada para a fabricação de gás, o que reduziria inclusive o investimento em dessalinização. Sem considerar a perda de H2 por evaporação, a mesma quantidade de água utilizado na fabricação será liberado na geração de energia elétrica no procedimento inverso (Gaetano et al., 2023).

Com os resultados obtidos, vemos que a geração de H2V somente com o excedente da geração eólica de apenas uma usina produziria 2.022 toneladas de gás. Ressaltando que a prioridade é o abastecimento elétrico da população, indústrias e comércios. No preço final do hidrogênio, seria retirado o investimento na fonte primária de energia, além do investimento no escoamento de energia elétrica no processo reverso, pois seria utilizada a rede própria da usina. As localizações das usinas no estado do Ceará também facilitaram o uso da água do mar, pois a grande maioria delas ficam localizadas próxima ao litoral.

4. Considerações Finais

Com a crescente demanda por energia elétrica aliada à necessidade de redução do impacto ao meio ambiente, há uma demanda cada vez maior pelo uso de fontes de energia renováveis. Mesmo tendo uma grande intermitência, o maior obstáculo energético é exatamente o armazenamento de energia, então o principal objetivo do artigo é demonstrar um uso viável para o potencial excedente desperdiçado dos parques eólicos, que pode agregar alto valor à usina e trazer uma maior oferta ao sistema, contornando assim o problema da intermitência na geração.

Com o alto potencial eólico do estado do Ceará, foi demonstrada uma forma sustentável de armazenamento de energia utilizando hidrogênio, que pode ser utilizado como vetor energético ou como combustível. Enfatizando a produção apenas com excedente, priorizando a geração direta de energia elétrica. Com esse potencial desperdiçado, e não explorado, devido à redução da geração, o hidrogênio se torna um importante aliado na transição energética para reduzir a dependência do uso de combustíveis fósseis no contexto global.

Em termos sustentáveis, em relação ao reuso da água, o ideal seria utilizar hidrogênio no próprio parque para gerar energia, porém deixo como sugestão para trabalhos futuros a análise financeira e/ou energética para utilização do H₂V no próprio parque através do processo reverso de eletrólise ou transportando-o para uma usina termoeétrica para ser utilizado como combustível, lembrando que o foco principal do trabalho é a geração de energia elétrica.

Para futuros trabalhos sugerimos uma análise financeira e/ou energética sobre a utilização do gás produzido para a geração de energia elétrica na própria usina ou em termoeletricas.

Agradecimentos

O autor agradece à Universidade Estadual do Ceará – UECE por tornar possível o presente artigo e ao professor Lutero pela orientação e aos coautores pela ajuda.

Referências

- ANEEL (2022). Resolução Normativa nº 1.030, de 26 de julho de 2022. *Agência Nacional de Energia Elétrica*. <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20221030.pdf>.
- Bizerra, A. M. C., Queiroz, J. L. A. de, & Coutinho, D. A. M. (2018). O impacto ambiental dos combustíveis fósseis e biocombustíveis: as concepções de estudantes do ensino médio sobre o tema. *Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)*, 13(3), 299–315.
- Camelo, H. N., Carvalho, P. C. M., Leal Jr, J. B. V. & Accioly Filho, J. B. P. (2008). Análise estatística da velocidade do vento no estado do Ceará. *Rev. Fortaleza*, 29(2), 211-223.
- Chen, H. et al. (2009). Progresso em sistemas de armazenamento de energia elétrica: uma revisão crítica. *Progresso em ciências naturais*, 19(3), 291-312.
- Dupont, F. H., Grassi, F. & Romitti, L. (2015). Energias renováveis: em busca de uma matriz energética sustentável. *Revista Eletrônica de Gestão Ambiental, Educação e Tecnologia*, 19, 70–81.
- Esteves, N. B. et al. (2015) Hidrogênio eólico e solar para potencial produção de amônia no estado do Ceará–Brasil. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(32), 9917-9923.
- Gaetano S., Gaetano M. & Agatino N. (2023). A revolução do hidrogênio verde. *Energia Renovável*, 216, 119041, 0960-148.
- Jordi C. G., Natasha E. B., João B. V. L. J., Daniel S. S. & Lutero C. L. (2023). “Potential to storage the excessive energy from wind energy through ammonia in the northeast of Brazil”. *International Journal of Development Research*, 13(05), 62679-62685.
- Kovač, A.; Paranos, M. & Marciuš, D. (2021). Hidrogênio na transição energética: uma revisão. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10016-10035.
- Lebrouhi, B. E. et al. (2022) Desenvolvimento global do hidrogênio - Uma visão geral tecnológica e geopolítica. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(11), 7016-7048.
- Lima, D. K. S. D., Leão, R. P. S., Melo, F. D. C., Sampaio, R. F., & Santos, A. C. S. D. (2020). Recurso eólico offshore-estudos de caso no Ceará.
- Marchenko, O. V. & Solomin, S. V. (2017). Modelagem de armazenamentos de hidrogênio e energia elétrica em sistemas de energia eólica/fotovoltaica na costa do Lago Baikal. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 9361-9370.
- ONS, (2023). Dados de geração eólica e solar. Operador Nacional do Sistema. <https://www.ons.org.br/paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/dados-de-geracao-eolica-e-solar>.
- ONS, (2023). O sistema em números. Operador Nacional do Sistema. <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.
- ONS, (2024). Dados de restrição de operação devido à restrição de energia de usinas eólicas. Operador Nacional do Sistema. https://dados.ons.org.br/dataset/restricao_coff_eolica_usi.
- ONS, (2024). Evolução da capacidade instalada. Operador nacional do Sistema. https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/evolucao_capacidade_instalada.aspx.
- Patricio, R. A. et al. (2012). Sistema de energia eólica de hidrogênio e a substituição gradual do gás natural no Estado do Ceará–Brasil. *International journal of hydrogen energy*, 37(9), 7355-7364.
- Rashid, M. M., Al Mesfer, M. K., Naseem, H., & Danish, M. (2015). Hydrogen production by water electrolysis: a review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and high temperature water electrolysis. *Int. J. Eng. Adv. Technol*, 4(3), 2249-895.
- Serra, E. T., Orlando, A. D. F., Mossé, A., & Martins, N. (2016). Armazenamento de energia: Situação atual, perspectivas e recomendações. *Comitê De Energia Da Academia Nacional De Engenharia*, 1, 1-46.

Tlili, Olfa et al. (2019). Avaliação de viabilidade de penetração no mercado de hidrogênio: Mobilidade e mercados de gás natural nos EUA, Europa, China e Japão. *Revista internacional de energia de hidrogênio*, 44(31), 16048-16068.

Veziroglu, T. N. (2007). 21st Century's energy: Hydrogen energy system. *Альтернативная энергетика и экология*, (4), 29-39.