

Viabilidade econômica de energia eólica *offshore* para geração de hidrogênio verde na descarbonização no litoral do Paraná

Economic viability of offshore wind energy for green hydrogen generation in decarbonization on the coast of Paraná

Viabilidad económica de la energía eólica marina para la generación de hidrógeno verde en la descarbonización en la costa de Paraná

Natália Mendes Azevedo¹
Juliana Almansa Malagoli²
Ricardo Barrim Chandoha³

Resumo: A redução de emissões poluentes tem estimulado o uso de fontes renováveis, destacando-se a energia eólica *offshore* por seu alto potencial e menor impacto ambiental. O litoral paranaense possui condições favoráveis para a implantação desse empreendimento devido aos ventos abundantes e suas características morfogeográficas. A questão central desta pesquisa é: qual o potencial eólico *offshore* no litoral do Paraná para a produção de hidrogênio verde? O objetivo é avaliar a viabilidade técnica e econômica dessa produção como alternativa sustentável de geração energética. O estudo exploratório analisou numericamente as condições do vento e realizou simulação no *software* RETScreen. Foram dimensionados oito aerogeradores de pequeno porte operando com velocidade média de 4 m/s, capazes de gerar 10,99 GWh em 20 anos. A diferença de 26,1% entre os modelos decorreu da consideração de variáveis operacionais e ambientais. Os resultados apontam viabilidade e reforçam o papel do empreendimento na descarbonização regional.

Palavras-chave: Gases Poluentes. Hidrogênio Renovável. Tecnologias Sustentáveis. Transição Energética. Ventos Marítimos.

Abstract: The reduction of polluting emissions has stimulated the use of renewable sources, highlighting offshore wind energy for its high potential and lower environmental impact. The coast of Paraná has favorable conditions for the implementation of this enterprise due to the abundant winds and its morphogeographic characteristics. The central question of this research is: what is the offshore wind potential on the coast of Paraná for the production of green hydrogen? The goal is to evaluate the technical and economic viability of this production as a sustainable alternative to energy generation. The exploratory study numerically analyzed the wind conditions and performed a simulation on the RETScreen software. Eight small wind turbines were sized operating with an average speed of 4 m/s, capable of generating 10.99 GWh in 20 years. The difference of 26.1% between the models resulted from the consideration of operational and environmental variables. The results point to feasibility and reinforce the role of the enterprise in regional decarbonization.

Keywords: Polluting Gases. Renewable Hydrogen. Sustainable Technologies. Energy Transition. Offshore Winds.

¹ Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária. Universidade Federal do Paraná (UFPR). ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4470-6004>. E-mail: mendesazevedo@ufpr.br.

² Doutora em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Paraná (UFPR). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8723-033X>. E-mail: juliana.malagoli@ufpr.br.

³ Graduando em Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Paraná (UFPR). ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7457-133X>. E-mail: ricardo.chandoha@ufpr.br.

Resumen: La reducción de emisiones contaminantes ha estimulado el uso de fuentes renovables, destacando la energía eólica marina por su alto potencial y menor impacto ambiental. La costa de Paraná tiene condiciones favorables para la implantación de este emprendimiento debido a los abundantes vientos y sus características morfogeográficas. La pregunta central de esta investigación es: ¿cuál es el potencial eólico offshore en la costa de Paraná para la producción de hidrógeno verde? El objetivo es evaluar la viabilidad técnica y económica de esta producción como alternativa sostenible de generación de energía. El estudio exploratorio analizó numéricamente las condiciones del viento y realizó simulación en el software RETScreen. Se dimensionaron ocho pequeños aerogeneradores operando a una velocidad media de 4 m/s, capaces de generar 10,99 GWh en 20 años. La diferencia del 26,1% entre los modelos se debió a la consideración de variables operativas y ambientales. Los resultados apuntan a la viabilidad y refuerzan el papel del emprendimiento en la descarbonización regional.

Palabras-clave: Gases contaminantes. Hidrógeno renovable. Tecnologías sostenibles. Transición energética. Energía eólica marina.

Submetido 03/09/2025

Aceito 11/03/2026

Publicado 07/04/2026

Considerações iniciais

Na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, realizada em Estocolmo, em 1972, o meio ambiente foi definido como um sistema físico e biológico no qual todos os seres vivos coexistem. Segundo La Rovere (1990), as ações humanas têm gerado efeitos negativos significativos na natureza. De acordo com a Resolução nº 01/1986 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o impacto ambiental é toda alteração nas características físicas, biológicas ou químicas do meio ambiente, causada por atividades humanas, que resulte em danos diretos ou indiretos à sociedade e ao meio ambiente.

Embora a energia elétrica seja indispensável para a sobrevivência e o desenvolvimento humano, é essencial buscar alternativas que minimizem os impactos ambientais e preservem os ecossistemas naturais (Pinto *et al.*, 2017). Além disso, o aquecimento global é um dos principais resultados das emissões de gases de efeito estufa na atmosfera. Os compostos como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozônio troposférico (O₃) e clorofluorcarbonos (CFCs) absorvem a radiação infravermelha gerada quando a luz visível do Sol incide sobre a superfície terrestre. Esse processo de absorção e reirradiação impede que parte do calor seja dissipada no espaço, levando ao aumento da temperatura na superfície do planeta (Ottinger, 2010).

Entre as alternativas sustentáveis, a energia eólica destaca-se pela sua contribuição à redução das emissões de CO₂. Por exemplo, uma turbina eólica de 600 kW, dependendo do regime de ventos e do fator de capacidade, pode evitar a emissão de aproximadamente 20.000 a 36.000 toneladas de CO₂ equivalente à geração convencional ao longo de sua vida útil, estimada em 20 anos (Tolmasquim, 2012). Esses dados evidenciam a relevância de soluções renováveis como a energia eólica para mitigar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade.

Diante desse cenário, este artigo busca responder à seguinte questão: é viável utilizar a energia eólica *offshore* no litoral do Paraná para produção de hidrogênio verde? O objetivo é avaliar essa viabilidade com base em critérios como características dos ventos, modelagem de sistemas híbridos, custos, tecnologias sustentáveis e impactos socioambientais, visando contribuir com dados estratégicos para políticas públicas voltadas à transição energética na região.

Metodologia

A pesquisa possui abordagem quantitativa, por utilizar dados numéricos sobre potencial eólico e viabilidade econômica da produção de hidrogênio verde. É de natureza aplicada, pois busca solucionar um problema específico de geração sustentável de energia, e tem caráter exploratório ao avaliar o potencial eólico *offshore* no litoral do Paraná e as possibilidades de produção de hidrogênio verde. Os procedimentos envolveram métodos documentais e bibliográficos e uma etapa experimental-simulativa com o *software* RETScreen.

Foram coletados e tratados dados de vento da COPEL, definindo-se velocidade média de 4 m/s, representativa das condições costeiras entre Matinhos e Pontal do Paraná e adequada para evitar superestimativas de geração. Com esses dados, realizou-se o dimensionamento do sistema eólico via modelagem analítica, considerando densidade do ar de 1,225 kg/m³, área do rotor, coeficiente de potência, curva de aerogeradores de pequeno porte e análise estatística pela distribuição *F* de Fisher-Snedecor.

A distribuição *F* de Fisher-Snedecor foi utilizada para avaliar a variabilidade dos custos e do desempenho dos aerogeradores, permitindo comparar as variâncias entre fatores técnicos (potência, perdas e velocidades do vento) e fatores econômicos (custo por kW e investimento total). O uso dessa distribuição é adequado quando se deseja comparar variâncias entre dois ou mais grupos estatísticos. A função densidade utilizada segue a formulação apresentada por Liberal (2014).

A partir disso, estimaram-se a potência e a energia anual, incluindo perdas, resultando na necessidade de oito aerogeradores para atender à demanda de um sistema de eletrólise ao longo de 20 anos, gerando 10,99 GWh no período. A energia foi integrada à modelagem do processo de eletrólise, considerando eficiência dos equipamentos, perdas do processo e necessidades de armazenamento, permitindo-se estimar a produção anual e acumulada de hidrogênio verde.

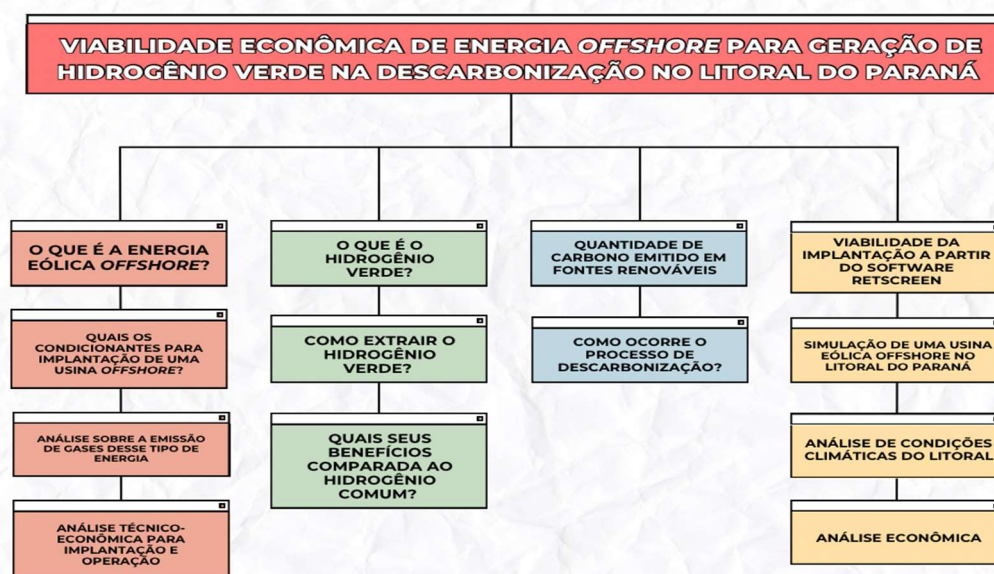
O modelo analítico foi validado no RETScreen, o que ampliou a análise ao incluir custos totais, emissões evitadas e fatores climáticos e marítimos, indicando resultados 26,1% superiores aos cálculos analíticos devido à modelagem financeira detalhada. A comparação entre métodos permitiu avaliar a coerência dos resultados e os impactos das escolhas metodológicas.

Reconhecem-se limitações, como a baixa resolução dos dados de vento, a falta de informações batimétricas e a ausência de análises de sensibilidade no *software*. Ainda assim, a metodologia demonstra a viabilidade técnica e econômica do sistema eólico *offshore* para produção de hidrogênio verde, contribuindo para o planejamento energético do litoral paranaense.

Planejamento através de um fluxograma

Nesta etapa, elaborou-se um fluxograma para organizar e sistematizar as atividades da pesquisa, definindo a sequência lógica das etapas a serem seguidas (Figura 1). Esse recurso metodológico permitiu estruturar o desenvolvimento do estudo de forma clara e objetiva, facilitando a visualização do processo e a integração entre as fases de dimensionamento técnico e análise de viabilidade.

Figura 1: Etapas do trabalho desenvolvido durante a Iniciação Científica



Fonte: autoria própria (2025).

A Figura 1 apresenta o fluxograma, que sintetiza a estrutura metodológica da pesquisa, evidenciando o encadeamento lógico entre as etapas de investigação. Inicialmente, aborda-se a fundamentação teórica sobre energia eólica offshore e hidrogênio verde, seguida pela análise dos condicionantes técnicos, ambientais e econômicos para a implantação de uma usina. Na sequência, são avaliadas as emissões de carbono e os benefícios da utilização do hidrogênio verde no processo de descarbonização. Por fim, destacam-se as simulações computacionais

realizadas no software RETScreen, a análise das condições climáticas do litoral paranaense e a avaliação da viabilidade econômica do projeto. Dessa forma, o fluxograma permite visualizar de maneira integrada o percurso metodológico adotado.

Estudo bibliográfico

Esta etapa da pesquisa foi dedicada aos levantamentos bibliográficos, com o objetivo de compilar fontes relevantes sobre energia eólica *offshore*, ventos, potência dos ventos, coeficiente de potência, perdas, hidrogênio renováveis e hidrogênio verde.

De modo geral, as usinas *offshore* tendem a apresentar melhor performance devido à superior qualidade do recurso eólico disponível no mar, onde os ventos sopram com velocidades mais elevadas, menor variabilidade e turbulência significativamente reduzida. Essa combinação resulta em maior densidade de potência e em um regime de ventos menos sujeito às interferências ambientais típicas do continente, como obstáculos naturais e construções. A captura de energia, portanto, ocorre de forma mais estável, conferindo às instalações marítimas uma capacidade produtiva superior à das estruturas instaladas em terra. Enquanto parques eólicos *onshore* enfrentam a influência de barreiras naturais e artificiais que reduzem a disponibilidade de vento, os sistemas *offshore* praticamente não enfrentam esse tipo de interferência (Desalegn *et al.*, 2023).

Os dados globais de 2018 indicam fatores de capacidade de aproximadamente 34% para usinas em terra e 43% para instalações marítimas, com projeções indicando crescimento para ambos até 2050. Em cenários brasileiros, especialmente nas regiões Nordeste e Sul, observa-se que a geração no mar tende a alcançar valores ligeiramente mais elevados, ainda que se apresente sazonalidade mais marcada no Nordeste. Em unidades equivalentes, a geração *offshore* normalmente supera a terrestre pela maior regularidade dos ventos oceânicos (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2020).

Apesar do ganho operacional, os sistemas marítimos apresentam o principal obstáculo em termos de custo. O custo nivelado de energia da geração *offshore* continua sendo significativamente mais alto devido à complexidade de sua implantação. As fundações marítimas, os cabos adequados às condições oceânicas, os equipamentos de instalação e manutenção especializados e a logística dificultada pela distância da costa resultam em

investimentos substancialmente superiores aos demandados pelas usinas *onshore* (Viterbo, 2008).

Do ponto de vista ambiental, ambas as modalidades se destacam por apresentarem impactos climáticos muito inferiores aos associados às fontes fósseis, embora os sistemas marítimos costumem apresentar uma pegada de carbono ligeiramente maior ao longo do ciclo de vida, em função da intensidade energética empregada na fabricação, na instalação e na manutenção. Estudos apontam que turbinas marítimas podem emitir mais gases de efeito estufa ao longo de seu ciclo completo do que as turbinas equivalentes instaladas em terra. Ainda assim, o tempo necessário para compensar essas emissões é relativamente curto, variando entre alguns meses, tanto para turbinas *onshore* quanto *offshore*, o que demonstra a alta eficiência climática desse tipo de tecnologia (Markard; Peterson, 2009; Dicorato *et al.*, 2011).

Apesar dessas diferenças, as duas modalidades compartilham características essenciais. Ambas são fundamentais para a ampliação da matriz energética renovável, possuem impacto ambiental relativamente baixo e apresentam ciclos de vida capazes de compensar suas emissões em períodos curtos. O potencial energético disponível, tanto em terra quanto no mar, supera amplamente a demanda global, e as projeções internacionais indicam uma expansão expressiva da capacidade instalada até meados do século, com estimativas de crescimento substancial para ambas as tecnologias (Desalegn *et al.*, 2023).

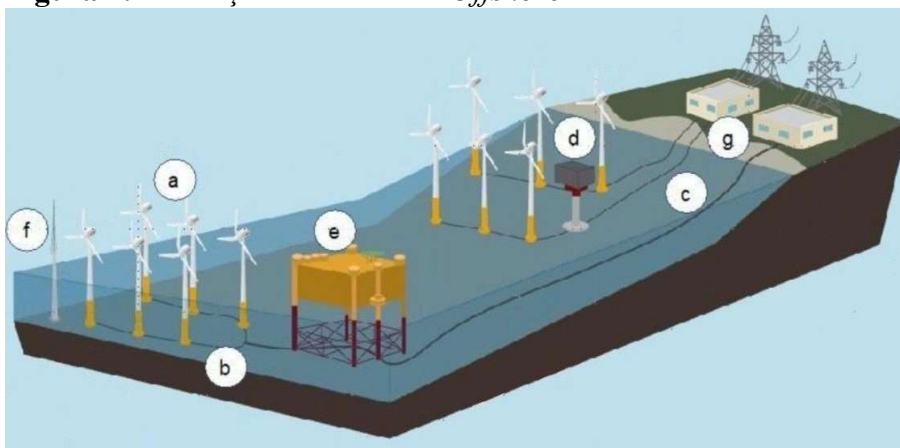
Um estudo conduzido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (*U.S. Department of Energy – DOE*) em parceria com o Departamento do Interior (*U.S. Department of the Interior – DOI*) identificou sete benefícios potenciais da energia eólica *offshore* para os consumidores e para a economia local, abrangendo aspectos econômicos, ambientais e energéticos (DOE; DOI, 2016). Entre os principais benefícios destacados estão: ausência de custos com combustíveis, contribuição para a maior confiabilidade do sistema elétrico nos horários de pico, redução da carga nos sistemas de transmissão, geração de empregos relacionados à manutenção da infraestrutura, fortalecimento da segurança energética nos estados costeiros, possibilidade de implantação de parques em larga escala e geração de externalidades positivas.

Por outro lado, a geração de energia em questão apresenta custos elevados durante o processo de construção e gera ruídos subaquáticos que afetam a vida marinha. Além disso, os aerogeradores podem ocupar rotas marítimas e o trabalho de manutenção pode ser limitado por

condições adversas (Azevedo; Nascimento; Schram, 2017). Segundo o Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP), a Energia Eólica Offshore trata-se de uma fonte de energia renovável obtida a partir da força dos ventos, com aerogeradores instalados no mar, alcançando maiores constância e velocidade. Esta energia gerada é transportada para as redes de distribuição através de cabos submarinos.

Uma usina eólica *offshore* é composta principalmente pelos seguintes equipamentos: sistemas de suporte (fundações e peça de transição); turbinas eólicas; sistemas de coleta e transmissão de energia elétrica; subestação (*offshore* e *onshore*); e uma torre meteorológica (Kaiser; Snyder, 2012). A Figura 2 apresenta a disposição desses elementos, incluindo: a) aerogeradores; b) cabos submarinos de coleta; c) cabos de exportação; d) transformador; e) subestação *offshore*; f) torre meteorológica; g) subestação *onshore*.

Figura 2: Instalação Usina Eólica *Offshore*



Fonte: adaptado de Nunes (2020).

Embora as turbinas eólicas *onshore* e *offshore* compartilhem componentes estruturais semelhantes, como: torre, rotor, gerador, multiplicadora e sistemas de controle, os ventos em ambientes *offshore* se destacam por apresentarem maiores intensidade e constância em termos de disponibilidade. Além disso, a implantação de usinas eólicas *onshore* exige grandes extensões de terreno, sendo frequentemente limitada por obstáculos decorrentes da urbanização, que reduzem a velocidade dos ventos. Esses empreendimentos também podem causar impactos visuais e sonoros à população, mesmo quando localizados a certa distância (Barbosa, 2018).

Em sua análise sobre o valor econômico dos recursos naturais, Agüero (1996) argumenta que, quando esses recursos são escassos e úteis, devem possuir valor econômico para serem utilizados de forma eficiente e conservados ao longo do tempo. Por outro lado, elementos naturais que sejam abundantes e de livre acesso: como o vento, o ar, a luz solar e a água do mar, embora úteis, apresentam utilidade marginal nula, e, por isso, tendem a ter preço igual a zero (Agüero, 1996).

Em um estudo desenvolvido para orientar decisões governamentais quanto à localização de usinas eólicas *offshore* nos Estados Unidos, Hoagland *et al.* (2006) aplicaram conceitos econômicos a fim de definir qual seria o recurso mais relevante no ambiente oceânico: o vento ou o espaço físico marítimo. Segundo os autores, o vento, mesmo afetado pelo chamado efeito de esteira, ao passar por turbinas, não perde qualidade para turbinas próximas, desde que respeitada uma distância mínima, o que se caracteriza como um recurso não rival ou quase-público. No entanto, por exigências técnicas, como a necessidade de se instalar turbinas em áreas específicas, o espaço ocupado se torna indisponível para outros usos, adquirindo, assim, caráter de exclusividade.

Ademais, a avaliação da potência do vento em uma determinada região é um fator fundamental para o funcionamento eficiente de um aerogerador. Nesse contexto, as pás do aerogerador estão acopladas a um rotor, que gira ao captar a energia cinética dos ventos. Esse rotor, por sua vez, está conectado a um sistema de multiplicação de velocidade, que tem a função de aumentar a rotação do eixo, otimizando a conversão da energia mecânica em energia elétrica por meio de um gerador. Esse processo viabiliza a utilização da energia eólica como uma fonte renovável e sustentável de eletricidade. A quantidade de energia gerada depende da densidade do ar, da área em que as pás do aerogerador abrangem e da velocidade dos ventos (Ramos, 2010). A potência do vento pode ser calculada:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

Onde: ρ é a massa específica do ar (kg/m^3), A é a área varrida pelas pás do aerogerador (m^2) e V é a velocidade do vento (m/s). Quanto maior for a área varrida pelas pás, maior será a potência que o aerogerador aproveitará do vento (Dalmaz *et al.*, 2008).

As turbinas de uma usina eólica têm a função de converter a energia cinética dos ventos em energia mecânica, a qual, posteriormente, é transformada em eletricidade (Burton *et al.*,

2011). No entanto, nem toda a potência presente no vento pode ser convertida em energia mecânica no eixo da turbina (Dutra, 2008). Para representar essa limitação, é utilizado o coeficiente de potência, um parâmetro adimensional que expressa a fração da energia cinética do vento efetivamente captada pelas pás do rotor e convertida em energia mecânica (Burton *et al.*, 2011; Letcher, 2023). Esse coeficiente corresponde à razão entre a potência extraída pelo aerogerador e a potência eólica disponível no vento:

$$Cp = \frac{P_{ext}}{\frac{1}{2}\rho AV^3} \quad (2)$$

Onde: Cp é o coeficiente de potência; P_{ext} é a potência extraída da turbina (W); ρ é a densidade (kg/m^3); A é a área (m^2); V é a velocidade (m/s). Para as simulações, foi adotado o valor de $Cp=0,40$, compatível com pequenas turbinas operando com velocidade média de 4 m/s, conforme Burton *et al.* (2011).

Durante o processo de produção de energia em um parque eólico *offshore*, devem ser considerados alguns efeitos que fazem com que a geração total de energia seja afetada. Desta forma, o vento, que passa pelo rotor de um aerogerador, segue em direção a outro aerogerador logo atrás dele; esse processo faz com que o aerogerador, que está localizado na frente, receba o vento com maior velocidade do que os que foram instalados atrás, diminuindo a produção de energia pela usina. Conforme o fluxo do vento avança para a jusante, o efeito esteira (Pee) começa a se espalhar, formando um vento circundante (Amaral, 2011). Neste sentido, a localização escolhida para instalar cada aerogerador deve ser levada em consideração para que se reduzam as perdas. Vale lembrar que as turbinas têm uma distância entre 5 a 9 diâmetros do rotor na direção onde o vento predomina (Letcher, 2023).

Além do efeito esteira, consideram-se as perdas causadas por fenômenos naturais (P_{amb}) como relâmpagos, neve e acúmulo de particulados (poeira, maresia) nas pás dos aerogeradores. Esses eventos afetam a integridade dos equipamentos e reduzem a eficiência na geração de energia. As perdas técnicas (P_{tec}) englobam perdas relacionadas ao funcionamento da tecnologia utilizada, como as perdas parasitárias (energia consumida para manter a usina funcionando) e as perdas por histerese (efeito magnético dos materiais) (Mone *et al.*, 2017). Já as perdas elétricas (P_{ele}) ocorrem durante a geração e a transmissão de energia pelos cabos submarinos. Por fim, as perdas por indisponibilidade (P_{indisp}) são derivadas de falhas nos sistemas dos aerogeradores, exigindo manutenções que interrompem a produção. A

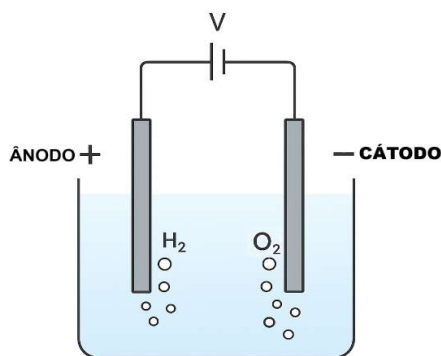
disponibilidade típica dos aerogeradores varia de 94% a 97%, podendo ser menor em alguns casos. O cálculo, considerando todas as perdas, é assim realizado (Nunes, 2020):

$$Perdas=1-[(1-P_{ee})*(1-P_{amb})*(1-P_{tec})*(1-P_{ele})*(1-P_{indisp})] \quad (3)$$

Do ponto de vista ambiental, existem duas formas menos poluentes para produção de hidrogênio, uma delas por eletrólise da água e a outra pelo processo biológico de fermentação anaeróbica (Ferreira, 2025). No primeiro caso, é necessária uma grande quantidade de energia solar ou eólica. O processo de eletrólise da água produz o hidrogênio verde e consiste na quebra da molécula de água em hidrogênio e oxigênio, com a passagem de eletricidade como mostrado na Eq. (4) e na Figura 3.



Figura 3: Processo de Eletrólise da água



Fonte: autoria própria (2025).

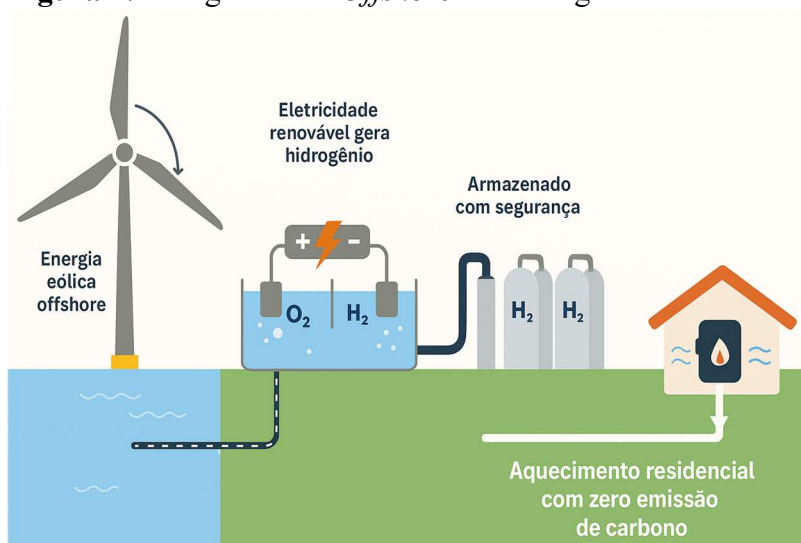
Já o segundo processo pode ser realizado por dois organismos diferentes: os mecanismos fotossintéticos (algas) e os mecanismos fermentativos (bactérias fermentativas). Somente os mecanismos fermentativos foram abordados neste tópico. O processo de fermentação consiste na quebra do açúcar por meio de qualquer reação. Essa produção biológica de hidrogênio se baseia na oxidação de matéria orgânica por bactérias fermentativas anaeróbias (atuam na ausência de oxigênio) ou anaeróbias facultativas (fermentam na presença ou na ausência de oxigênio), utilizando a matéria orgânica como fonte de carbono e nutrientes para reprodução e crescimento, ou seja, para sua sobrevivência (Silva, 2016).

O hidrogênio classificado como renovável é classificado por uma cartela de cores. Desta forma, além do hidrogênio verde produzido por eletrólise da água, existe também o hidrogênio

azul, este que é considerado uma solução de baixo carbono, produzido a partir da reforma do seu gás natural, rico em metano; e o seu maior potencial está na captura e armazenamento do carbono gerado. O dióxido de carbono formado é injetado em reservatórios subterrâneos de gás (Ferreira, 2025).

De acordo com Barroso *et al.* (2022), a produção de hidrogênio verde por meio da eletrólise da água ainda requer elevados investimentos. Isso se deve ao fato de que a eletricidade necessária para alimentar o eletrolisador deve ser proveniente de fontes renováveis. Caso contrário, o hidrogênio não pode ser classificado como “verde”, uma vez que sua produção passaria a depender de fontes poluentes de energia. De acordo com a *International Renewable Energy Agency – IRENA* (2025), o hidrogênio gerado através da eletrólise da água pode ser produzido através de água e eletricidade (Figura 4).

Figura 4: Energia Eólica *Offshore* ao Hidrogênio Verde



Fonte: adaptado de Mesquita (2001).

O processo inicia-se com a captação da energia cinética do vento por turbinas instaladas no mar, que convertem tal energia em eletricidade. Essa eletricidade alimenta um sistema de eletrólise da água, no qual moléculas de H_2O são divididas em oxigênio (O_2) e hidrogênio (H_2). O hidrogênio, por sua vez, é armazenado em tanques de alta pressão e, posteriormente, transportado por uma rede de dutos. O uso final substitui o gás natural ou a eletricidade fóssil nas residências, promovendo emissões zero de carbono. Este ciclo exemplifica uma estratégia

eficiente para descarbonização do setor energético, ao combinar geração renovável com armazenamento e uso limpo da energia (Mesquita, 2021).

O mercado de eletrolisadores voltados à produção de hidrogênio limpo ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento. Os principais tipos de eletrolisadores utilizados na eletrólise da água, para a produção de hidrogênio verde, incluem diferentes tecnologias com características específicas. O eletrolisador alcalino (AEL), em suas versões simples, de pilha e de sistema, destaca-se por sua relativa facilidade de fabricação (*International Renewable Energy Agency – IRENA, 2025*). Já o eletrolisador com membrana de troca de prótons (PEM) utiliza uma membrana que desempenha duas funções principais: transportar as cargas iônicas (prótons solvatados) e impedir a mistura dos gases gerados. O eletrolisador de membrana de troca aniônica (AEM), segundo a *International Renewable Energy Agency – IRENA (2025)*, apresenta conceitos semelhantes aos do PEM, mas com diferenças nos materiais utilizados. Por fim, o eletrolisador de óxido sólido (SOEC) opera em altas temperaturas, entre 800 °C e 1.000 °C, realizando a eletrólise do vapor de água por meio de tecnologia baseada em óxidos sólidos.

Dimensionamento do sistema eólico

Nesta terceira etapa, para a instalação de um sistema de geração de energia eólica, o custo está associado a diversas variáveis, como a velocidade do vento na região, a potência e a quantidade de aerogeradores a serem instalados, o tipo de inversor de energia utilizado, a demanda energética por residência, entre outros parâmetros técnicos. Neste estudo, considera-se o consumo médio por residência, que varia entre 900 e 1000 kWh por mês.

Com o objetivo de tornar o projeto economicamente viável, optou-se pela utilização de turbinas de pequeno porte, dimensionadas para operar em faixas de velocidade do vento entre 3 e 12 m/s. Segundo o *Atlas do potencial eólico do Estado do Paraná*, a velocidade do vento na região analisada varia entre 3,5 e 4 m/s. Para fins de modelagem e estimativas, adotou-se uma velocidade média de 4 m/s, sendo os inversores de energia selecionados compatíveis com essa condição operacional (Schultz *et al.*, 2007).

Desta forma, as turbinas de pequeno porte necessitam de 2,7 a 4 m/s para começarem a gerar energia. Com isso, podem ser instaladas até 75 metros, altura em que, segundo o *Atlas do*

potencial eólico do Estado do Paraná, a região registra velocidade média de 4 m/s, entre 30 a 70 metros de distância da costa (Figura 5).

Figura 5: Estudo do Parque Eólico em Pontal do Paraná



Fonte: adaptado de Google Maps (2025).

A proposta da Figura 5 ilustra a instalação de um parque eólico *offshore* no litoral do Paraná, entre as cidades de Guaratuba e Paranaguá. As turbinas estão posicionadas em alto-mar, em uma faixa compreendida entre 30 e 70 metros de extensão e até 75 metros de profundidade, o que indica a viabilidade técnica para fundações fixas. A proximidade com áreas urbanas, como Pontal do Paraná e Matinhos, facilita o escoamento da energia gerada para o continente. Essa configuração busca aproveitar a intensidade e a constância dos ventos marítimos da região, promovendo uma alternativa sustentável e estratégica para diversificação da matriz energética paranaense.

Para a análise estatística e a modelagem dos custos, foi utilizada a distribuição de Fisher (também conhecida como distribuição F de Snedecor), com o objetivo de avaliar a variância entre os fatores envolvidos. Assume-se que a variável aleatória contínua x segue uma distribuição F_{v_1, v_2} , com v_1 e v_2 graus de liberdade, cuja função densidade de probabilidade é dada por (Liberal, 2014):

$$F(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{v_1+v_2}{2}\right)\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{v_1/2} x^{(v_1/2)-1}}{\Gamma\left(\frac{v_1}{2}\right)\Gamma\left(\frac{v_2}{2}\right)\left(1+\frac{v_1}{v_2}x\right)^{(v_1+v_2)/2}} \quad (5)$$

Onde: v_1 e v_2 são os graus de liberdade denotados por F_{v_1, v_2} ; Γ é o componente de comparação da variância do vento.

Adicionalmente, a quantidade de aerogeradores a ser instalada em um parque eólico *offshore* está diretamente relacionada ao desempenho individual de cada máquina na geração de energia. Nesse contexto, a razão entre a energia anual gerada por um aerogerador e a área da seção transversal de seu rotor é denominada *EAPAR*, conforme apresentado:

$$EAPAR = \frac{EAAP}{A} \quad (6)$$

Onde: *EAPAR* é a energia anual produzida por metro quadrado de área do rotor (MWh/m² /ano); *EAP* é a energia anual produzida (MWh/ano); *A* é a área da seção transversal do rotor (m²). A partir desta distribuição, tornou-se possível estimar o custo do projeto, considerando o valor do dólar (Março/2025).

A estimativa do custo total do projeto foi baseada na análise dos principais componentes do sistema, como infraestrutura de transmissão, turbinas eólicas, eletrolisadores, sistemas de armazenamento e transporte de hidrogênio, além das operações de manutenção. Foram utilizados dados da literatura especializada e valores médios de mercado, garantindo maior consistência e aderência às condições reais de implantação. Dessa forma, obtém-se uma estimativa mais realista e confiável para a avaliação da viabilidade econômica do projeto.

O Quadro 1 apresenta de forma sistematizada os principais equipamentos envolvidos nas etapas de instalação, funcionamento e manutenção de uma Unidade de Energia *Offshore* (UEO), evidenciando a integração entre geração de energia e produção de hidrogênio verde. Na etapa de geração, destacam-se as turbinas eólicas *offshore*, responsáveis por converter a energia cinética dos ventos em energia elétrica, apoiadas por torres e sistemas de ancoragem que garantem estabilidade estrutural no ambiente marítimo. Em seguida, a transmissão de energia é realizada por cabos submarinos e subestações *offshore* e *onshore*, que atuam na condução, conversão e distribuição da eletricidade gerada até os sistemas de produção.

Quadro 1 – Equipamentos de Instalação, Funcionamento e Manutenção da UEO

ETAPA	EQUIPAMENTO	FUNÇÃO
Geração de Energia	Turbinas eólicas <i>offshore</i>	Gerar energia elétrica a partir da força dos ventos marítimos
	Torres eólicas	Suporte estrutural das turbinas
	Ancoragens	Fixar as torres no leito marinho
Transmissão de Energia	Cabos submarinos de potência	Conduzir a eletricidade gerada até a costa ou plataforma de conversão
	Subestação <i>offshore</i>	Converter e estabilizar a tensão elétrica para transmissão
	Subestação <i>onshore</i>	Receber e distribuir a energia elétrica para os eletrolisadores
Produção de Hidrogênio	Eletrolisadores	Realizar a eletrólise da água para gerar hidrogênio
	Compressores de hidrogênio	Aumentar a pressão do hidrogênio para armazenamento ou transporte
	Secadores e purificadores	Garantir a qualidade do H ₂ produzido, removendo impurezas
Armazenamento e Transporte	Tanques de armazenamento de hidrogênio	Conter o hidrogênio em estado comprimido ou liquefeito
	Dutos	Transportar o H ₂ até o ponto de uso
Monitoramento e Controle	Sistema de controle	Monitorar e controlar o parque eólico e a produção de H ₂ em tempo real
	Sensores meteorológicos e oceânicos	Coletar dados de vento, maré e condições ambientais
	Drones	Monitoramento visual
Manutenção	Embarcações de apoio (navios, balsas)	Transporte de equipamentos e pessoal técnico para as estruturas <i>offshore</i>
	Plataforma de manutenção	Manutenção e operação contínua

Fonte: autoria própria (2025).

No Quadro 1, observa-se que na etapa de produção de hidrogênio, os eletrolisadores desempenham papel central ao realizar a eletrólise da água, sendo complementados por compressores, secadores e purificadores que asseguram a qualidade e viabilidade do armazenamento e transporte do hidrogênio. Esse transporte ocorre por meio de tanques e dutos, enquanto o sistema como um todo é monitorado por tecnologias avançadas, como sensores e sistemas de controle em tempo real, além de drones para inspeção visual. Por fim, a operação contínua é garantida por estruturas e equipamentos de manutenção, como embarcações de apoio e plataformas *offshore*, assegurando a eficiência, segurança e sustentabilidade do sistema ao longo de seu ciclo de vida.

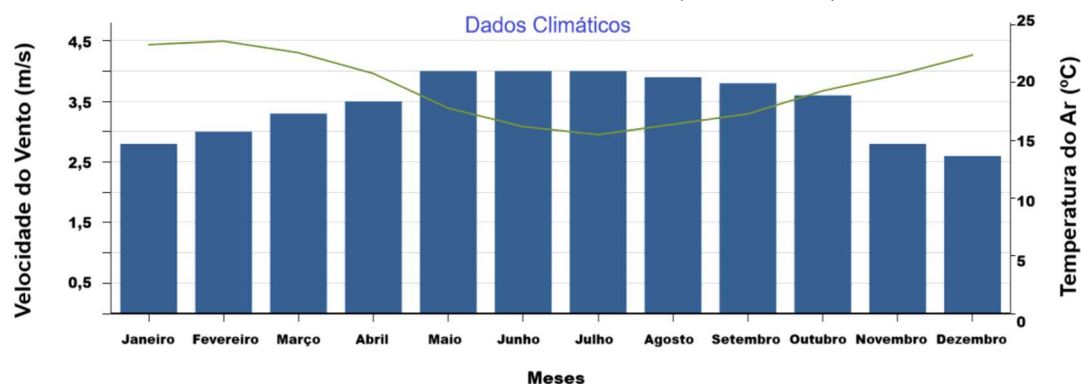
Simulação com o *software* RETScreen

Por último, utilizou-se o *software* RETScreen, uma ferramenta de análise energética amplamente utilizada em estudos de viabilidade de projetos renováveis. Ele permite avaliar variáveis técnicas, econômicas e ambientais, incorporando elementos como custos de capital, eficiência operacional, perdas do sistema, emissões evitadas e análise financeira ao longo do ciclo de vida do empreendimento. Desta forma, tornou-se possível simular o desempenho do sistema, permitindo avaliar sua viabilidade técnica e econômica. Considerando os avanços tecnológicos, torna-se viável analisar, em larga escala, a implementação de um parque eólico *offshore* no litoral do Paraná.

Para isso, a utilização do *Software* RETScreen permite simular sistemas híbridos de energia e, assim, avaliar a alternativa de modo técnico-econômico, além de analisar o funcionamento de projetos de geração de energia sustentável na região de interesse. Para o uso do *software*, dele foram retirados alguns dados fornecidos por seu banco de dados, e o *software* esboça o gráfico de velocidade do vento no litoral do Paraná (Gráfico 01).

Os dados referentes à velocidade média dos ventos e às condições climáticas ao longo do ano foram essenciais para a estimativa do potencial eólico no litoral do Paraná. Com base nas simulações realizadas, foi possível projetar a implantação de um parque eólico *offshore* na região, considerando não apenas aspectos ambientais, mas também parâmetros técnicos e econômicos. Dessa forma, a análise integrada contribui para uma avaliação mais robusta da viabilidade do empreendimento.

Gráfico 01 – Velocidade do Vento Litoral do Paraná (RETScreen)



Fonte: autoria própria (2025).

A utilização do *software* RETScreen permitiu a realização de uma análise detalhada das condições específicas da região, possibilitando a avaliação da viabilidade técnica do projeto. Com a construção da usina, a eletricidade gerada pelas turbinas eólicas instaladas no mar será transmitida por cabos submarinos até unidades de eletrólise, responsáveis por separar o hidrogênio da molécula de água, produzindo, então, o hidrogênio verde e liberando a molécula de água. Com isso, a emissão de gases poluentes emitidos em usinas termoelétricas é reduzida, auxiliando no processo de descarbonização do litoral do Paraná.

Análise dos dados e resultados

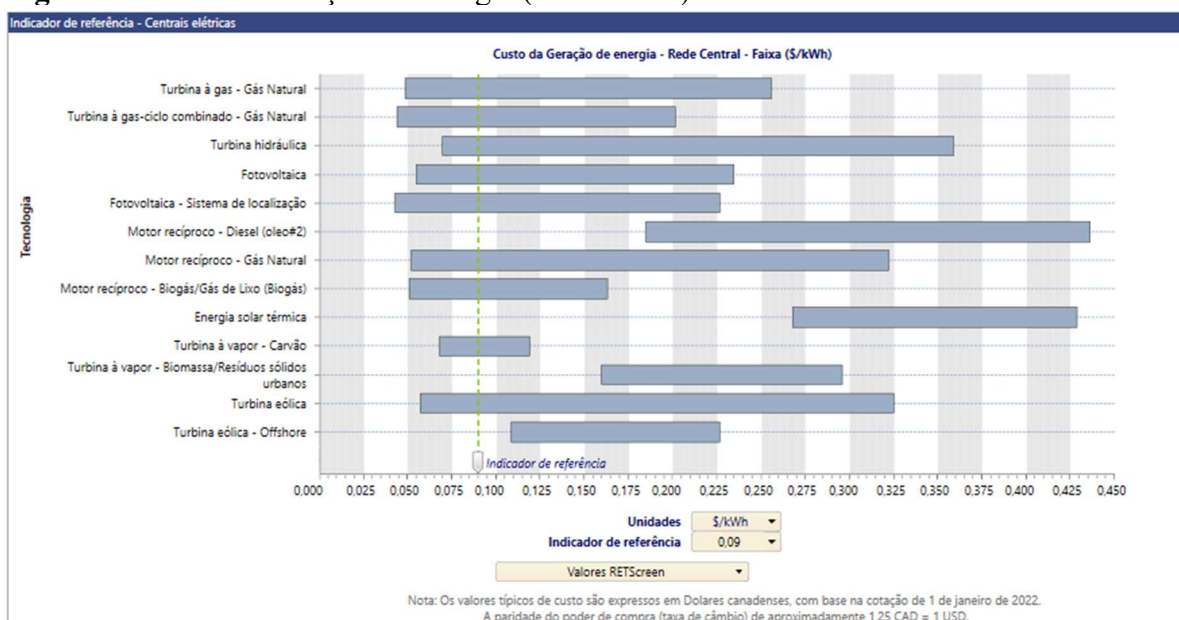
Os resultados obtidos no presente estudo foram fundamentais para avaliar a viabilidade econômica da implantação de uma usina eólica *offshore* no litoral do Paraná, com ênfase na produção de hidrogênio verde como vetor para a descarbonização regional. Para isso, foram utilizados dois métodos distintos: a modelagem numérica a partir da Eq. (4) de Fisher – considerando as perdas do efeito esteira, a perda ambiental, a técnica, as falhas, a elétrica – e da Eq. (5), para analisar o desempenho de cada aerogerador; e a simulação computacional por meio do *software* RETScreen. Ambos os métodos adotaram como base a velocidade média do vento da região, fixada em 4 m/s, conforme dados do *Atlas do potencial eólico do Estado do Paraná* (Schultz *et al.*, 2007).

A modelagem numérica, fundamentada na Eq. (4), de Fisher (distribuição *F* de Snedecor), foi utilizada como ferramenta estatística para estimar a variabilidade dos custos e interpretar os fatores que impactam o investimento em um sistema de geração *offshore*. Essa abordagem foi complementada com o uso da equação clássica da potência do vento, onde foram

utilizados os seguintes parâmetros: densidade do ar de 1,225 (kg/m³), área varrida pelas pás de 200 (m²) e velocidade média do vento de 4 (m/s). A potência obtida pelo aerogerador foi de 7.840 W, ou 7,84 kW.

E, ainda, as equações para analisar a produção de cada turbina, como na Eq. (5); o coeficiente de potência na Eq. (2), para avaliar a efetividade do rotor; e as perdas sofridas na Eq. (3), no processo de produção, também foram consideradas para análise de custo e dimensionamento. Para o cálculo de custos, foi estimado o valor médio entre as 5 empresas que atendem cerca de 95% de todo o mercado, sendo elas: GE, Sinovel, MHI Vestas, Siemens Gamesa e Sewind (Oliveira, 2024). A análise indica um custo de instalação de aproximadamente 920 dólares (por kW) para o modelo similar ao *Gamesa G39*. Assim, o custo total estimado por aerogerador foi de 7.212 dólares. Considerando a cotação do dólar em março de 2025 (R\$ 5,79), o valor total por unidade ficou em R\$ 41.757,00. Essa estimativa representa exclusivamente o investimento de capital inicial e não contempla custos de manutenção (20 anos) e operação.

Figura 6: Custo de Geração de Energia (RETScreen)



Fonte: autoria própria (2025).

Por outro lado, na Figura 6, o *software* RETScreen foi utilizado para realizar uma simulação abrangente, incorporando dados climáticos específicos da região e parâmetros

operacionais do sistema. O programa estimou um custo de geração de energia eólica *offshore* de aproximadamente 0,175 dólares por kWh, valor que corresponde a R\$ 0,275 por kWh com a mesma taxa de câmbio.

Além disso, o RETScreen forneceu dados sobre custo anual de operação, retorno sobre investimento, redução de emissões de gases de efeito estufa e outros indicadores fundamentais para uma análise de viabilidade ambiental e econômica. A ferramenta demonstrou que o uso da energia eólica *offshore* associada à produção de hidrogênio verde pode gerar impactos positivos tanto na matriz energética, quanto nas metas de sustentabilidade da região.

A análise de custos de um projeto de energia eólica *offshore*, no *software* RETScreen (Figura 7), estima um investimento inicial de R\$ 56.500,00 por aerogerador, com custos anuais de operação e manutenção em torno de R\$ 1.960.000. Ainda que os custos iniciais de projetos *offshore* sejam elevados, especialmente devido à infraestrutura marítima e logística, esses empreendimentos têm longa vida útil e baixos custos operacionais a longo prazo.

Com base na comparação entre os métodos analítico e simulado, observou-se que ambos estimam a necessidade de oito aerogeradores para alcançar a geração total de energia de aproximadamente 10.988.544 (kWh) ao longo de 20 anos. No método analítico, essa estimativa parte da potência unitária de 7,84 (kW) por turbina, operando 8.760 horas por ano, resultando em uma produção individual de 1.373.568 (kWh) em 20 anos. Já o *software* RETScreen, ao considerar o mesmo número de aerogeradores e uma base de dados climáticos regionais, também projeta essa geração acumulada.

Figura 7: Análise de Custo Anual para Usina Eólica *Offshore* (RETScreen)

RETScreen - Análise de Custos Assinante: Visualizador

Custos iniciais (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
Custo inicial				\$ 54.000.000
Mostrar dado				
Engenharia	custo	1	\$ 2.500.000	\$ 2.500.000
Total de custos de investimento				\$ 56.500.000
Custo anual (créditos)	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
Custo de operações e manutenção (economia)	projeto			\$ 1.200.000
Mostrar dado				
Peças e mão de obra	custo	61.000	\$ 10	\$ 610.000
Outro	custo	2	\$ 75.000	\$ 150.000
Total de custos anuais				\$ 1.960.000
Economia anual	Unidade	Quantidade	Custo unitário	Quantidade
Definido pelo usuário	custo			\$ -
Economia total anual				\$ -

Fonte: autoria própria (2025).

No entanto, a divergência entre os métodos ocorre nos custos: o modelo analítico estima um custo unitário inicial de R\$ 41.757,00 por aerogerador, totalizando R\$ 334.056,00 para o conjunto, enquanto o RETScreen apresenta um investimento inicial de R\$ 56.500,00 por aerogerador, resultando em R\$ 452.000,00. Portanto, o erro percentual entre os dois métodos é de 26,1%. Essa diferença pode estar relacionada à abrangência do RETScreen, que incorpora aspectos operacionais e ambientais na análise, enquanto o método analítico fornece uma visão simplificada, centrada apenas no equipamento gerador.

Além disso, do ponto de vista ambiental, um dos principais benefícios desse tipo de geração está na redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂). Diferentemente de fontes fósseis, como carvão, petróleo, ou gás natural, a energia eólica não emite CO₂ durante sua operação. Isso significa que, ao se substituírem matrizes energéticas poluentes por turbinas eólicas, especialmente em regiões costeiras, como o litoral do Paraná, contribui-se diretamente para a mitigação das mudanças climáticas.

Ademais, no aspecto ambiental, os resultados demonstram que a adoção do sistema analisado permitiria significativa redução nas emissões de gases de efeito estufa, quando se substituem fontes fósseis por hidrogênio verde. A produção contínua de hidrogênio ao longo dos 20 anos estimados representa uma contribuição direta à descarbonização, alinhada às metas globais de transição energética. A simulação mostrou que, ao fornecer energia renovável a eletrolisadores de alta eficiência, o sistema pode evitar emissões equivalentes associadas à geração termoeletrica, fortalecendo a relevância ambiental do projeto (Figura 8).

Figura 8: Análise de Emissões de Gases (RETScreen)

RETScreen - Análise de Emissões Assinante: Visualizador

Análise de Emissões

Sistema elétrico de referência (Baseline)	Tipo de Combustível	Fator de Emissão de GEE (excl. T&D) tCO ₂ /MWh	Perdas T&D %	Fator de emissão de GEE tCO ₂ /MWh
Pais - região	Brasil	0,100	7,0%	0,107
Eletricidade exportada p/ rede	MWh	274.466	Perdas T&D	7,0%
Emissão de GEE				
Caso de referência	tCO ₂	29.394		
Caso proposto	tCO ₂	2.058		
Redução anual bruta de emissões de GEE	tCO ₂	27.337	93%	

Fonte: autoria própria (2025).

A análise econômica, por sua vez, indica que o sistema apresenta viabilidade dentro do horizonte de 20 anos, embora os custos iniciais e operacionais sejam significativamente

influenciados pelo ambiente *offshore*. A comparação entre métodos mostra que o modelo analítico tende a subestimar custos, uma vez que não incorpora fatores como logística marítima, manutenção especializada, corrosão e eventuais perdas na transmissão de energia. O RETScreen, ao integrar esses elementos, oferece uma visão mais realista e conservadora. Ainda assim, os resultados convergem ao demonstrar que o sistema pode operar com desempenho satisfatório e geração consistente de energia renovável ao longo de sua vida útil.

De modo geral, os resultados alcançados reforçam o potencial da energia eólica *offshore* como vetor estratégico para a produção de hidrogênio verde no litoral do Paraná. Tanto o modelo analítico quanto as simulações computacionais confirmam a viabilidade técnica e sugerem compatibilidade econômica em longo prazo, ainda que a implementação real demande aprofundamentos adicionais, especialmente no que se refere à disponibilidade de dados de vento de alta resolução e ao detalhamento das condições oceanográficas. A análise integrada apresentada neste estudo contribui para consolidar o entendimento sobre a aplicação regional dessa tecnologia, fornecendo subsídios para políticas públicas, planejamento energético e pesquisas futuras na área.

Considerações finais

A análise das questões iniciais da pesquisa, voltada à verificação da viabilidade de implantação de uma usina eólica *offshore* no litoral do Paraná, permitiu constatar que os resultados obtidos por meio do *software* RETScreen, quando comparados com os valores de potência do vento da região, apresentaram significativa coerência, reforçando a confiabilidade das análises, evidenciando que o aproveitamento do potencial eólico marítimo, associado à produção de hidrogênio verde, demonstra viabilidade técnica e econômica. A ferramenta RETScreen, por sua vez, oferece uma abordagem mais completa, enquanto o cálculo analítico, embora mais simplificado, se mostra útil para o dimensionamento preliminar e a validação inicial de custos.

Diante disto, os objetivos da pesquisa foram alcançados, uma vez que se analisaram as características dos ventos locais e se realizou o dimensionamento técnico de um parque eólico *offshore*, estimando-se os custos de instalação e operação, avaliando o processo de eletrólise para produção de hidrogênio, além de, por fim, ter sido realizada a comparação entre diferentes métodos de análise.

Dentro dos métodos de análise, a modelagem numérica baseada em Fisher permitiu estabelecer parâmetros realistas de produção e custo dos aerogeradores, fornecendo dados quantitativos relevantes para o planejamento e dimensionamento inicial do projeto. Apesar de simplificada, essa abordagem demonstrou ser eficaz para estimativas iniciais. Por outro lado, o programa RETScreen ofereceu uma visão integrada da viabilidade do sistema, incluindo variáveis ambientais, eficiência energética e retorno sobre o investimento. Com isso, observou-se diferença de 26,1% nos custos estimados, o que demonstra a importância da consideração de variáveis operacionais e ambientais em análises mais completas. Apesar do maior custo inicial apresentado pelo RETScreen, os benefícios de longo prazo e a sustentabilidade do projeto justificam o investimento.

Entre os principais resultados, ressalta-se a concordância entre os valores obtidos pelo cálculo analítico e pela simulação computacional, ambos indicando a necessidade de oito aerogeradores para se alcançar uma geração acumulada de aproximadamente 10,99 GWh em 20 anos. Durante o desenvolvimento da pesquisa, algumas dificuldades foram identificadas. A mais relevante diz respeito à obtenção de estimativas precisas de custos para equipamentos e infraestrutura, devido à variação de preços em função de fornecedores.

Desta forma, a energia eólica *offshore*, no litoral do Paraná, surge como solução promissora para a transição energética e para a produção de hidrogênio verde, tendo em vista que as condições estudadas são suficientes para suprir a demanda de energia no processo de eletrólise, e que os custos se mostram compatíveis com o cenário. Com isso, sua implementação apresenta diversos benefícios ambientais, entre eles, a descarbonização da região.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela Fundação Araucária (FA) e pela Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior do Paraná (SETI).

Referências

AGÜERO, Pedro Hubertus Vivas. **Avaliação econômica dos recursos naturais**. Tese (Doutorado em Economia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

AMARAL, Bianca Mesquita. **Modelos VARX para Geração de Cenários de Vento e Vazão Aplicados à Comercialização de Energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2011.

AZEVEDO, João Paulo Minardi de; NASCIMENTO, Raphael Santos do; SCHRAM, Igor Bertolino. Energia eólica e os impactos ambientais: um estudo de revisão. **Revista Uningá**, Maringá, v. 51, n. 1, p. 101-106, 2017.

BARBOSA, Robson. **Inserção da energia eólica offshore no Brasil: análise de princípios e experiências regulatórias**. Tese (Doutorado em Energia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

BARROSO, Amanda Maria Rodrigues *et al.* Obtenção do hidrogênio verde a partir de energias renováveis. **Revista Arte, Ciência e Tecnologia**, Teresina, v. 2, n. 25, p. 1-13, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997**. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 1997. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0237-191297.PDF>. Acesso em: 30 de out. 2024.

BURTON, Tony *et al.* **Wind Energy Handbook**. 2.ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

DALMAZ, Alessandro *et al.* Energia eólica para geração de eletricidade e a importância da previsão. **Revista ABCM–Engenharia**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 27-32, 2008.

DESALEGN, Belachew *et al.* Onshore versus offshore wind power trends and recent study practices in modeling of wind turbines' life-cycle impact assessments. **Cleaner Engineering and Technology**, London, v. 17, n. 100691, p. 1-12, 2023.

DICORATO, Maria *et al.* Guidelines for assessment of investment cost for offshore wind generation. **Renewable Energy**, London, v. 36, n. 8, p. 2043-2051, 2011.

DUTRA, Ricardo Marques. **Energia eólica: princípios e tecnologia**. Rio de Janeiro: Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio de Salvo Britto, 2008. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/downloads/energia-eolica-principios-tecnologias.pdf>. Acesso em 20 de nov. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Roadmap Eólica Offshore Brasil**. Perspectivas e caminhos para a energia eólica marítima. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2020. Disponível em: epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao456/Roadmap_Eolica_Offshore_EPE_versao_R2.pdf. Acesso em: 19 de nov. 2025.

FERREIRA, Vitor Francisco *et al.* Hidrogênio: o combustível da transição energética. **Revista Virtual de Química**, São Paulo, v. 17, n. 4, p. 514-555, 2025.

HOAGLAND, Porter *et al.* **Legal and regulatory framework for siting offshore wind energy facilities.** Westborough, Massachusetts: Massachusetts Technology Collaborative, 2006. Offshore Wind Energy Collaborative Pilot Projects Grant Program. Disponível em: <https://www.mresearch.com/pdfs/docket4185/NG11/doc45.pdf>. Acesso em: 15 de mar. 2025.

IRENA. **Renewable energy statistic 2025.** Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2025. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_DAT_RE_Statistics_2025.pdf. Acesso em: 05 de ago. 2025.

LA ROVERE, Emílio Lèbre. **A Energia e meio ambiente.** Meio ambiente: aspectos técnicos e econômicos. Brasília, p. 11-34, 1990. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/12041/1/Cap1_energia_e_meio_ambiente.pdf. Acesso em: 15 de out. 2024.

LARA, Daniela Mueller de; RICHTER, Marc François. Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro. **Novos Cadernos NAEA**, Belém, v. 26, n. 1, p. 413-436, 2023.

LETCHER, Trevor. **Wind Energy Engineering: a Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines.** 2.ed. London: Elsevier, 2023.

LIBERAL, Tatiana. **Probabilidade II.** João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Estatística, 2014. Disponível em: <http://www.de.ufpb.br/~tarciana/Probabilidade2/Aula16.pdf>. Acesso em: 20 de nov 2025.

MARKARD, Jochen; PETERSEN, Regula. The offshore trend: Structural changes in the wind power sector. **Energy Policy**, London, v. 37, n. 9, p. 3545-3556, 2009.

MESQUITA, João Lara. **Hidrogênio verde, possível combustível do futuro.** Mar sem fim, 2021. Disponível em: <https://marsemfim.com.br/hidrogenio-verde-possivel-combustivel-do-futuro/>. Acesso em: 08 de jul 2025.

MONE, Christopher *et al.* **2015 Cost of Wind Energy Review.** Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2017. Disponível em: <https://docs.nrel.gov/docs/fy17osti/66861.pdf>. Acesso em: 10 de out. 2024.

NICODEMOS, Renata Matos *et al.* Produção de Hidrogênio a partir de fontes renováveis. **Horizonte Científico**, Uberlândia, v. 5, n. 1, p. 1-24, 2011.

NUNES, João Paulo Costa. **Energia eólica offshore: um estudo de caso para análise da viabilidade técnico-econômica de uma usina próxima à costa do Rio Grande do Norte.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2020.

OLIVEIRA, Matheus de Lucas dos Santos de. **Otimização da geração de energia eólica e ondas com base no aproveitamento da infraestrutura de transmissão.** Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

OTTINGER, Richard Lawrence, Energy Efficiency: The best immediate option for a secure, clean, and healthy future. **Strategic Planning for Energy and the Environment**, London, v. 30, n. 2, p. 20-44, 2010.

PINTO, Lucía Iracema Chipponelli *et al.* O mercado brasileiro da energia eólica, impactos sociais e ambientais. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 12, n. 6, p. 1082-1100, 2017.

RAMOS, Bruno Christófar. **Estudo do potencial eólico em offshore para a geração de energia elétrica no litoral do Paraná.** Monografia (Graduação em Oceanografia). Universidade Federal do Paraná, Pontal do Paraná, 2010.

SCHULTZ, Dario Jackson *et al.* **Atlas do potencial eólico do Estado do Paraná.** Curitiba: Agência Nacional de Energia Elétrica-Copel, 2007.

SILVA, Inara Amoroso da. Hidrogênio: combustível do futuro. **Ensaio e Ciência: ciências biológicas, agrárias e da saúde**, Campo Grande, v. 20, n. 2, p. 122-126, 2016.

TOLMASQUIM, Maurício Tiomno. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos avançados**, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 247-260, 2012.

UNITED STATES. Department of Energy (DOE); Department of the Interior (DOI). **National offshore wind strategy:** facilitating the development of the offshore wind industry in the United States. Washington, DC: U.S. Department of Energy and Interior, 2016. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2016/09/f33/National-Offshore-Wind-Strategy-report-09082016.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2025.

UNITED STATES. Department of Energy (DOE). **Wind vision:** a new era for wind power in the United States. Washington, DC: U.S. Department of Energy, 2015. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/prod/files/WindVision_Report_final.pdf. Acesso em: 6 jul. 2025.

VITERBO, Jean Carlo. **Geração de energia elétrica a partir da fonte eólica offshore.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.