

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE ATRAVÉS DE UM PARQUE EÓLICO OFFSHORE DEDICADO NO BLOCO DE LIBRA

Eng. Luisa Dahlem Almeida¹, Eng. Jéssica Carvalho¹, Prof.^a Dr.^a Adriane Prisco Petry¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul

luisadahlem@gmail.com
jessica.carvalho@ufrgs.br
adrianep@mecanica.ufrgs.br

RESUMO

Este artigo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de recursos eólicos offshore para produzir hidrogênio verde no bloco Libra (FPSO pioneiro), localizado na região do pré-sal da Bacia de Santos, através de uma simulação do potencial de geração de energia elétrica por meio de turbinas eólicas flutuantes. Foram utilizados os dados horários de velocidade do vento do ERA5 em níveis únicos fornecidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) e a versão estudantil do software WAsP fornecido pela Universidade Técnica da Dinamarca (DTU). A produção anual para o parque eólico de 150 MW de potência instalada foi de aproximadamente 730 GWh, com um fator de capacidade de 54,4%, capaz de produzir 10.595.807,19 kg de hidrogênio por ano, considerando que o parque é inteiramente dedicado para produção de hidrogênio. Assim, verificou-se a viabilidade da integração dos sistemas visando produzir hidrogênio bem como prospecção, construção e operação de parques offshore, alinhados com uma consistente política de apoio e avanços regulatórios.

Palavras-chave: energia eólica, *offshore*, hidrogênio, eletrólise

ABSTRACT

This paper aims to evaluate the technical and economic feasibility of using offshore wind resources to produce green hydrogen in the Libra block (pioneer FPSO), located in the pre-salt region of the Santos Basin, through a simulation of the potential for electricity generation through wind turbines. The ERA5 wind speed hourly data on single levels provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) and the student version of the WAsP software provided by the Technical University of Denmark (DTU) were used. The annual production for the 150 MW wind park was approximately 730 GWh with a capacity factor of 54,4%, capable of producing 10.595.807,19 kg of hydrogen per year considering that all the electricity produced was used in the electrolysis process. Thus, it was seen that the integration of both systems is viable and can produce hydrogen from offshore park prospecting, construction, and operation decrease, aligned with strong political and regulatory support.

Keywords: *wind energy, offshore, green hydrogen, electrolysis.*

1. INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento constante das aplicações industriais, juntamente com a contínua evolução tecnológica observada nos últimos 20 anos, a demanda por energia está aumentando rapidamente. Atualmente, cerca de 80% da matriz energética global provém de combustíveis fósseis, e esse número vem diminuindo ano após ano devido à crescente preocupação em reduzir a emissão de gases poluentes na atmosfera (IEA, 2022). Em 2018, quase todas as nações do mundo assinaram o Acordo de Paris, que tem como objetivo limitar o aumento da temperatura a 2°C acima dos níveis pré-industriais. Nesse cenário, a energia eólica é considerada uma das soluções mais eficientes entre as alternativas para avançar na descarbonização da economia, pois seu combustível é abundante, renovável e facilmente aproveitável.

Na busca por um futuro neutro em carbono, o hidrogênio - que é o elemento mais abundante no planeta - desempenha um papel fundamental nesse cenário devido à sua versatilidade. A molécula pode ser utilizada em processos térmicos, transporte marítimo, armazenamento de energia e, recentemente, como substituto dos combustíveis à base de carbono. Para transformar o hidrogênio de gás para

combustível, é necessária uma grande quantidade de energia, que pode ser tanto fóssil quanto renovável, e de acordo com o Escritório de Eficiência Energética e Energias Renováveis (2020), 95% de todo o hidrogênio atualmente produzido vem de combustíveis fósseis utilizados em processos térmicos. Atualmente, as alternativas aos processos térmicos são a produção por fotólise direta, biomassa, fermentação bacteriana ou eletrólise da água. Em todos esses processos, as emissões de carbono podem ser nulas (SAE Brasil, 2023).

A eletrólise da água é o método mais comum para produzir hidrogênio verde. Nesse processo, a água é separada em hidrogênio e oxigênio utilizando eletricidade. O uso de turbinas eólicas para fornecer a eletricidade necessária ao processo de eletrólise é viável e tem sido estudado em todo o mundo por diversos pesquisadores. O trabalho de Dihn et al. (2020) é um dos estudos mais completos encontrados na literatura para o cenário offshore, no qual foram calculadas a estimativa de produção de energia, o tamanho da planta de eletrólise, a produção de hidrogênio variando com a velocidade do vento ao longo do tempo e a análise do retorno sobre o investimento. O cenário construído foi uma fazenda eólica offshore de 101,3 MW na Irlanda. Os resultados apresentaram um sistema lucrativo de produção de hidrogênio até 2030, com um preço de 5 euros por kg de hidrogênio, além de capacidade de armazenamento em terra variando de 2 a 45 dias. Na mesma linha de pesquisa, Lucas et al. (2022) conduziram uma análise utilizando a fazenda eólica offshore WindFloat Atlantic, em Portugal, para capacidades de 25 e 150 MW. Verificou-se que a produção de hidrogênio nas condições estudadas é promissora, apesar de sua dependência de diversos fatores, sendo o fator de capacidade do eletrólito um fator significativo.

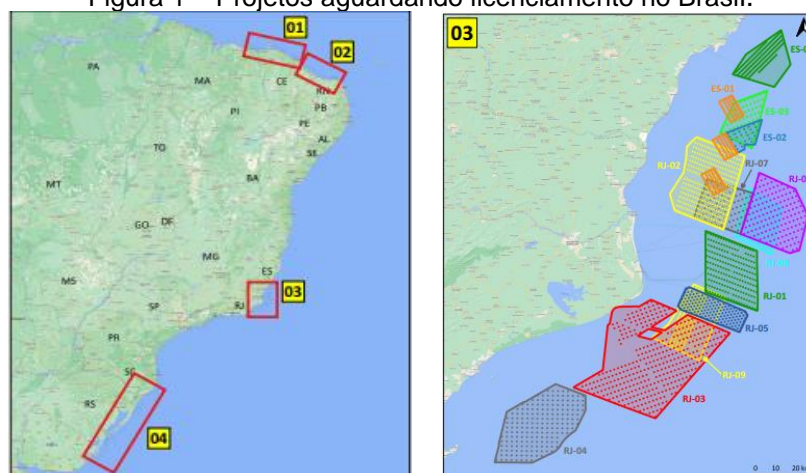
Considerando isso, estudos que promovam uma análise mais aprofundada do potencial de produção de hidrogênio verde por meio da eletrólise da água integrada à energia eólica offshore contribuem para o objetivo de reduzir as emissões de carbono, além de diversificar a matriz energética do Brasil. Além disso, é possível promover o avanço de novas tecnologias nacionais, concomitantemente com a geração de novas oportunidades de emprego dentro da indústria de energia.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A Energia Eólica Offshore no Brasil

O Brasil é conhecido mundialmente por sua abundância em riquezas naturais e isso também se aplica na indústria eólica. O recurso eólico local é de alta qualidade e de acordo com a 58ª edição do Índice de Atratividade de Países em Energia Renovável (RECAI) entre 2020 e 2021 o Brasil saltou da 11ª para a 9ª posição entre os países com maior potencial para atrair projetos em energia renovável, no mundo. Os parques eólicos instalados no Brasil apresentaram um fator de capacidade médio de 43,6%, valor acima da média mundial de 34% (ABEEÓLICA, 2021). De acordo com a última atualização do IBAMA em dezembro de 2022, o Brasil tem 70 parques offshore em licenciamento ambiental totalizando 176,5 GW, ou seja, o equivalente a mais de 12 usinas Itaipu. Na Fig. 1 é possível observar as localizações dos parques que aguardam o licenciamento ambiental e o detalhamento dos empreendimentos na região da costa próxima a região de interesse no presente artigo.

Figura 1 – Projetos aguardando licenciamento no Brasil.



Fonte: IBAMA, 2021

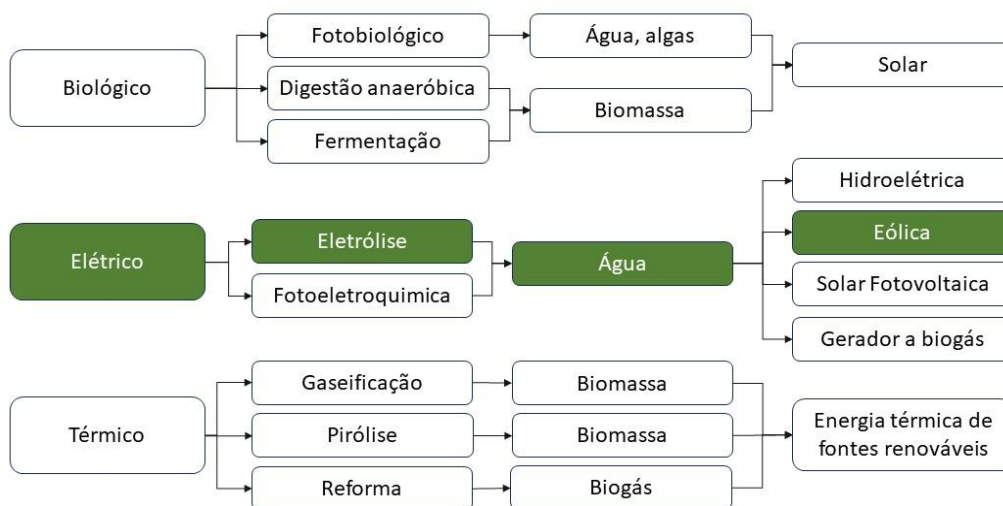
Dentre os principais motivos do crescente interesse nos projetos offshore, destaca-se uma maior disponibilidade de área no mar onde podem ser instalados parques eólicos maiores. A sua colocação (suficientemente distante das áreas populacionais) permite reduzir a preocupação ambiental no que diz

respeito à emissão de ruído, quase sempre relacionado com o aumento da velocidade da pá. A distância da costa permite também reduzir o impacto visual do parque (Esteban et al., 2007). A principal desvantagem dos parques offshore é o seu alto investimento inicial. Nos parques eólicos onshore, o custo dos aerogeradores é de cerca de 75% do custo total do projeto, sendo este percentual em instalações offshore de aproximadamente 33%, o que pode ser explicado principalmente devido aos elevados custos das operações marítimas (Martins et al., 2022). Além disso, normalmente não existe uma infraestrutura elétrica existente que ligue a planta de geração com os centros consumidores, levando à construção de redes elétricas mais longas, além do fortalecimento daquelas existentes para possibilitar o escoamento de potência (Martins et al., 2022).

2.2 O Hidrogênio Verde

O hidrogênio verde é obtido através de fontes renováveis de energia. As energias térmica e elétrica utilizadas nos processos podem ser: solar, hídrica, eólica, eletricidade da queima de biogás em motor de combustão interna e biomassa (PAULINO, 2017). Este pode ser obtido através dos processos mostrados no fluxograma da Figura 2. O fluxograma também mostra a matéria-prima e o método utilizado no processo. Este estudo adota a sequência destacada em negrito.

Figura 2 – Principais etapas dos processos para obtenção do hidrogênio verde



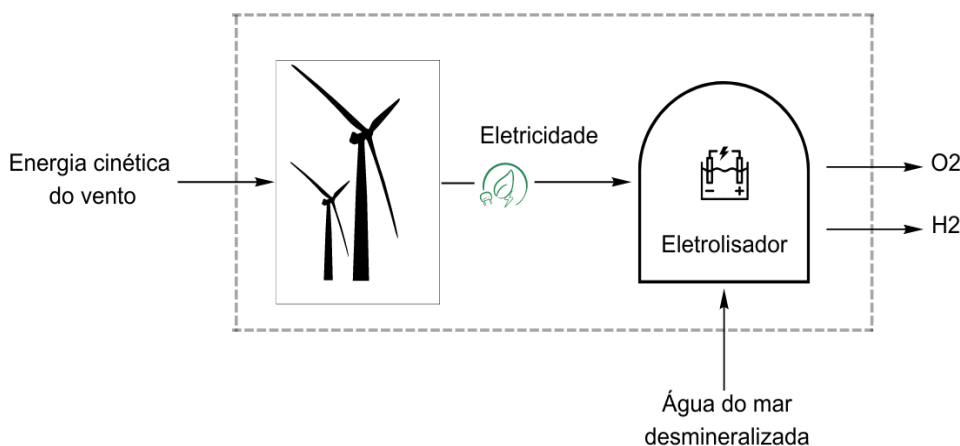
Fonte: Adaptado Acar et al., 2013.

2.2.1 Eletrólise

Por definição, a eletrólise da água é a reação química de oxirredução ocasionada pela passagem de corrente elétrica contínua, equivalente à dissociação da molécula de água nos seus constituintes, a saber, o hidrogênio e o oxigênio, na presença de um eletrólito (GOMES, 2022). Para o processo a água deve ser previamente desmineralizada e na presença de catalisadores que aceleram a reação. O processo de eletrólise é livre de poluição quando são analisadas as emissões da fonte de eletricidade usada no processo (LEVIN et al., 2010). Porém, apenas 4% da produção mundial de hidrogênio é feita por este processo (VIOLA, 2015).

A metodologia utilizada para produção de hidrogênio por eletrólise é simples e conhecida, porém a desmineralização da água e o custo da eletricidade incrementam significativos custos de operação, o que dificulta a sua ascensão como uma opção economicamente viável (HOSSEINI; WAHID, 2016). A Figura 3 representa o esquema da produção de hidrogênio através da eletrólise abastecida com água do mar e provida de energia eólica.

Figura 3 – Ilustrativo da interação eólica com processo de eletrólise para produção do hidrogênio verde



Fonte: Autoras (2023)

A Equação 1 apresenta a reação química global do processo de eletrólise. O volume do hidrogênio é o dobro do volume de oxigênio. A energia necessária para 1 kg de H₂ é 39,699 kWh ou 142,1 MJ (Keçebas e Kayfeci, 2022).



2.3 Configuração do Sistema

Os eletrolisadores convencionais utilizam eletrólitos alcalinos, uma solução de hidróxido de potássio aquoso (KOH), principalmente com concentração de 20-30%, devido a ótima condutividade e resistência à corrosão. As temperaturas e pressões normais de funcionamento destes eletrolisadores são 70-100 °C e 1 – 30 bar, respectivamente (WENDT e PLZAK (1991) apud ULLEBERG (2003)). A Tabela 1 apresenta os principais sistemas de eletrólise e suas características.

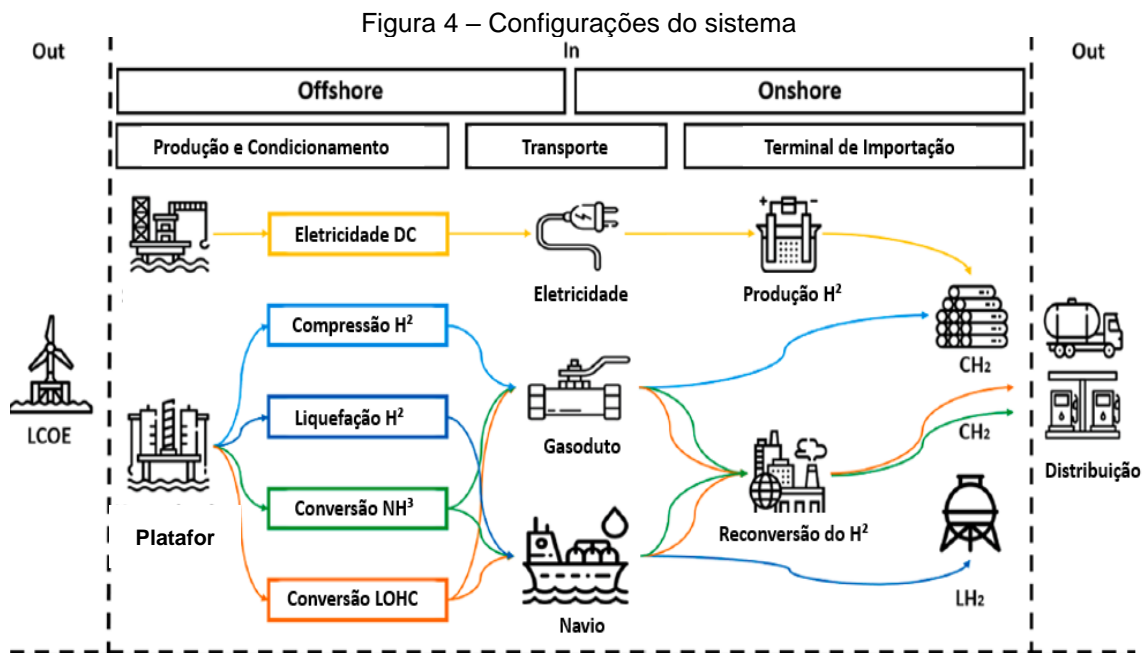
Tabela 1 - Principais sistemas de eletrólise

Sistema	Descrição	Vantagens
Eletrólise Alcalina (AE)	Nesse processo a água é decomposta em uma solução alcalina, geralmente hidróxido de potássio (KOH) ou hidróxido de sódio (NaOH). A solução alcalina facilita a condução da eletricidade e minimiza a corrosão dos eletrodos	Geralmente é mais econômica e madura tecnologicamente
Eletrólise de Membrana por troca de Prótons (PEM)	Nesse caso a água é decomposta em uma célula eletrolítica composta por uma membrana polimérica de troca de prótons. Essa membrana permite a passagem de íons de hidrogênio, enquanto impede o fluxo de elétrons, separando assim o hidrogênio e o oxigênio	Mais eficiente em termos de energia, possui uma forma de operar mais flexível e tem um tempo de resposta mais curto
Eletrólise de Carbonato Fundido (MCE)	É um sistema que opera em temperaturas elevadas, normalmente acima de 500°C, onde a água é decomposta em uma solução de carbonatos fundidos, como carbonato de potássio (K ₂ CO ₃) ou carbonato de sódio (Na ₂ CO ₃). Esse sistema é adequado para aplicações com alta temperatura como processos industriais que requerem calor adicional	É mais adequada para aplicações de alta temperatura em indústrias

Fonte: Adaptado de Castro R. e Calado G. (2021) , Franco et. al. (2020) e IRENA (2018)

Para seleção do sistema que será utilizado na produção de hidrogênio por eletrólise através da energia eólica deve-se levar em consideração a localização da instalação, podendo ser *onshore* ou *offshore*. Essa ponderação ocorre por conta de questões ambientais mais severas quando *offshore*, como ventos fortes, água salgada, ondas e marés; acesso dificultado à manutenção, logística de transmissão por dutos e transporte de insumos. A Figura 4 apresenta os principais sistemas estudados hoje.

No cenário *offshore*, a energia produzida pela central eólica é levada por cabos até uma plataforma próxima contendo os eletrolisadores evitando-se grandes perdas na transmissão da energia elétrica pelos cabos, transformadores e outros dispositivos eletrônicos de potência (em torno de 1% a 5%). (CASTRO e CALADO, 2021). O transporte do hidrogênio pode ser feito de diversas maneiras, tanto por gasodutos - quando a distância até a costa não for muito elevada, até sua conversão em Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC), que são compostos químicos líquidos que podem armazenar e transportar hidrogênio de forma eficiente. Esse tipo de sistema isolado também traz uma solução para áreas mais remotas e muito distantes da costa, como é o caso das plataformas de petróleo que, por funcionarem em alto mar, necessitam produzir a própria energia elétrica. Assim, o parque eólico pode tanto suprir a planta de eletrólise quanto a energia necessária para as operações de exploração e habitabilidade de seus funcionários, sendo um substituto às turbinas a gás.

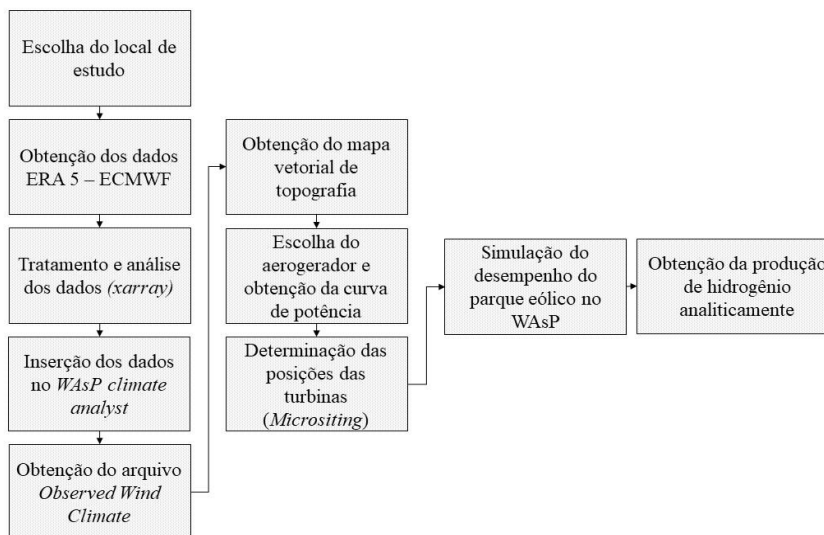


Fonte: Adaptado de Franco et al. (2020)

3. METODOLOGIA

A Figura 5 apresenta graficamente a metodologia utilizada para realização do presente estudo. Primeiramente, será escolhido um local de estudo que esteja dentro da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) para então realizar a aquisição dos dados de reanálise do ERA-5, disponibilizado pelo ECMWF. Como os dados são fornecidos em formato *netCDF*, foi utilizada a biblioteca da base de dados em linguagem de programação *python* para tratamento, análise dos dados e sua conversão no formato *csv* para ser inserido no software *WAsP* (DTU, 2021). Após obtenção do arquivo *Observed Wind Climate* (OWC) juntamente com o mapa vetorial de topografia do local, a curva de potência do aerogerador e o *layout* do parque, a produção anual de energia é obtida através de uma simulação no *WAsP*. Aplicando-se toda essa energia elétrica na planta de eletrólise, a produção de hidrogênio é obtida através de forma analítica. Por fim, foi realizada uma análise econômica do estudo.

Figura 5– Representação das principais etapas da Metodologia



Fonte: Autoras (2023)

3.1 Local de Estudo

O local escolhido para realização do estudo é onde fica situado o navio-plataforma do tipo FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*) Pioneiro de Libra, fruto de um investimento de US\$ 1 bilhão da *joint venture* 50/50 formada pela Ocyan e pela Teekay Offshore (OCYAN, 2022), instalado na região pelo Consórcio de LIBRA. O Bloco de Libra – especialmente o Campo de Mero - está localizado na Bacia de Santos, a 165 km do litoral do estado do Rio de Janeiro, em lâmina d’água variando entre 1.700 m e 2.300 m, com uma área de 1.547 km² (PETROBRAS, 2022). Na Figura 6 é apresentado o mapa de localização do bloco.

Figura 6 - Mapa de Localização do Bloco de Libra



Fonte: Adaptado de Petrobras, 2022

O navio-plataforma está localizado na Latitude: 24°32’24,179” S e Longitude: 42°07’54,637” e (OCYAN, 2022) iniciou operação em dezembro de 2017 e tem como objetivo a realização de testes de longa duração (TLDs) e sistemas de produção antecipada (SPAs) para avaliar o comportamento do reservatório de petróleo do Bloco. A produção de petróleo é armazenada no FPSO e escoada através de navios aliviadores, enquanto o gás produzido é parcialmente consumido na unidade de produção e o restante reinjetado no reservatório.

No presente estudo o sistema proposto é composto por um parque eólico offshore dedicado ao abastecimento de eletrolisadores alocados nas bases dos aerogeradores. Devido à distância do local de estudo até a costa ser de

aproximadamente 200 km, o hidrogênio produzido é então liquefeito e armazenado em tanques para seu transporte por navios até a costa.

3.2 Análise do Recurso Eólico

Para realização de uma análise do recurso eólico, foi utilizada a base ERA 5 - mais recente conjunto de dados globais horários de reanálise do clima fornecido pela *European Center for Medium Range Weather Forecasting* (ECMWF) - com resolução de 31 km. Além das velocidades de vento, a base fornece dados de uma série de parâmetros atmosféricos, da superfície terrestre e do estado do mar, juntamente com estimativas de incerteza (ECMWF, 2017). Dessa forma, foi selecionado um ponto distante aproximadamente 5 km do navio para análise dos dados. A Tabela 2 apresenta as principais características da base utilizada.

Como os dados fornecidos pela plataforma são no formato *netCDF*, foi necessária a utilização da linguagem de programação *python* em combinação ao conjunto de funções e estruturas de dados da biblioteca *xarray* (HOYER; HAMMAN, 2017) para o acesso e análise dos dados. Posteriormente, os dados exportados em formato *csv* foram importados no *WAsP Climate Analyst* para construção do *Observed Mean Wind Climate (OMWC)* – que é o resumo estatístico do clima médio do vento para o local de estudo. Após a obtenção do OMWC foi possível desenvolver a hierarquia completa para simulação no *WAsP*.

Tabela 2 - Informações sobre a base de dados utilizada

Dados de Reanálise	
Base de Dados	ERA 5
Coordenada do Ponto	-24,5°, -42,25°
Alturas de Medição	100 m
Período de Medição	2012 - 2017
Intervalo de Medição	60 minutos

Fonte: Autoras, 2023

3.3 Escolha do Aerogerador

Como a profundidade do mar no local de estudo pode chegar a 2.000 m, a utilização de turbinas com fixação no solo foi descartada. As turbinas eólicas flutuantes surgiram nesse cenário para resolver o problema da necessidade de fundações em águas profundas. Em vez de serem fixadas no fundo do mar, as turbinas são montadas em uma subestrutura flutuante que é amarrada com cabos de amarração e âncoras. (NEXANS, 2022). Para realização do estudo, o *layout* do parque foi proposto empregando a turbina de referência desenvolvida pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) e a *Technical University of Denmark* (DTU) através da *International Energy Agency* (IEA). As turbinas de referência disponibilizam parâmetros de projeto para serem utilizados como linhas de base para estudos que exploram novas tecnologias ou metodologias e permitem a colaboração entre a indústria e pesquisadores externos (NREL, 2020). A Tabela 3 apresenta as principais características do aerogerador escolhido.

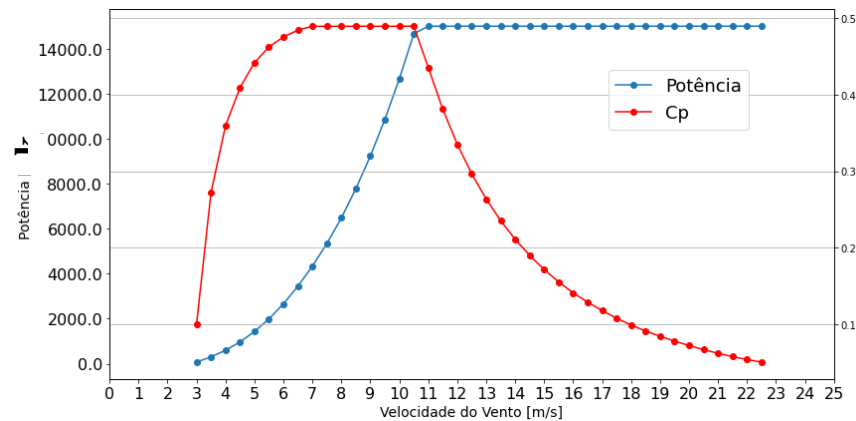
Tabela 3 - Especificação técnica do aerogerador

IEA Wind 15MW Offshore Reference Wind Turbine	
Potência Nominal	15 MW
Altura de <i>Hub</i>	150 m
Velocidade de vento mínima corte (<i>Cut-in speed</i>)	3 m/s
Velocidade de vento máxima corte (<i>Cut-out speed</i>)	23 m/s
Diâmetro do Rotor	242 m
Área varrida pelas pás	45996 m ²

Fonte: Autoras, 2023

A curva de potência de um aerogerador representa a relação entre a sua potência elétrica disponível e a velocidade de vento incidente no momento. Com isso, pode-se estimar o desempenho da máquina no local escolhido. Através da curva, pode-se observar que a velocidade de partida do aerogerador selecionado é de 3 m/s, a velocidade nominal - ou seja, àquela em que o aerogerador atinge sua potência nominal - é de 11 m/s e a sua velocidade de corte é de 23 m/s. Na Figura 7 é possível observar a curva de potência do aerogerador escolhido para o estudo.

Figura 7 – Curva de Potência IEA 15MW Reference Turbine



Fonte: Adaptado de NREL, 2019

A curva de potência de um aerogerador representa a relação entre a sua potência elétrica disponível e a velocidade de vento incidente na altura de eixo da turbina. Com isso, pode-se estimar o desempenho da máquina no local escolhido. Através da curva, pode-se observar que a velocidade de partida do aerogerador selecionado é de 3 m/s, a velocidade nominal - ou seja, àquela em que o aerogerador atinge sua potência nominal - é de 11 m/s e a sua velocidade de corte é de 23 m/s.

3.4 Extrapolação Vertical da Velocidade do Vento

A metodologia do *software* WAsP consiste em cinco blocos de cálculo principais: análise de dados brutos de velocidade de vento; geração de atlas de velocidade de vento; estimativa do clima generalizado de vento; estimativa do potencial eólico e estimativa da produção de energia de parques eólicos. Além disso, o WAsP contém um modelo para efeitos de esteira de parques eólicos e um modelo de estabilidade para condições médias de fluxo de calor. Para extrapolação horizontal e vertical, o WAsP usa o modelo IBZ linear integrado, que terá um desempenho adequado para terreno plano a moderadamente complexo. (DTU, 2021)

Como a velocidade de vento fornecida pelo ERA-5 é a 100m de altura, foi necessária a extrapolação vertical da velocidade de vento para a altura de *hub* do aerogerador. O *software* utiliza o modelo logarítmico baseado no método do *European Wind Atlas* (EWA), que calcula "desvios induzidos pela estabilidade do perfil do vento logarítmico, aplicando a teoria de perturbação tanto para a forma de Monin-Obukhov do perfil do vento quanto para a lei de arrasto geostrófico" (TROEN, 2016). O perfil médio do vento é aplicado como uma função da cobertura do solo, mais especificamente, dos comprimentos de rugosidade da superfície.

3.5 Produção de Energia Elétrica

Após reunidos os dados da turbina e os dados de velocidade e direção de vento no ponto de análise, foi possível realizar uma modelagem computacional no *software* WAsP para obtenção da energia anual produzida. Uma vez que a curva de potência $P(u)$ é medida para uma turbina eólica, a produção média de energia pode ser estimada aplicando-se a função de densidade de probabilidade da velocidade do vento na altura do cubo. Por fim, a produção total de energia é calculada como a soma das produções de energia setoriais. Para cálculo da energia produzida pelo parque, o WAsP utiliza um modelo matemático do efeito esteira atrás de uma turbina desenvolvido por Jensen (1984) e adaptado por Katic et al. (1986) para parques eólicos reais. Neste modelo, a esteira é assumida como se expandindo linearmente atrás do rotor. Assim, as únicas variáveis são o déficit de velocidade inicial no início da esteira, avaliado a partir do coeficiente C_t (coeficiente de empuxo) da turbina em velocidade real do vento, e a constante de decaimento da esteira, que é a taxa de expansão (decomposição) da esteira. A constante de decaimento do efeito de esteira em aplicações offshore é recomendada ter um limite inferior de $k = 0,04$ (DTU, 2021).

A construção do layout do parque foi feita buscando o melhor aproveitamento do recurso eólico disponível e, como não há limitação de espaço para construção do parque, os aerogeradores foram dispostos lado a lado em uma linha perpendicular à maior incidência de vento, esperando-se diminuir significativamente o efeito de esteira no parque.

3.6 Produção de Hidrogênio Verde

O cenário estudado considera que o parque eólico *offshore* é inteiramente dedicado à produção de hidrogênio. Isso implica que toda eletricidade produzida pela usina é destinada para o processo de eletrólise, bem como a dessalinização da água do mar consumida no processo e compressão do hidrogênio produzido. Por conta dessas características, na seleção da célula eletrolítica foi levada em consideração a eficiência no processo, ciclo de vida do equipamento, adequação à flutuação das cargas geradas pelo parque eólico e a produção de hidrogênio em baixa pressão. O eletrolisador escolhido foi do tipo PEM devido às considerações qualitativas expostas na Tabela 1. As especificações do eletrolisador previstas para 2030 utilizados neste estudo de caso estão listadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações do eletrolisador utilizado para produção de hidrogênio

Eletrolisador Proton Exchange Membrane (PEM)		
Consumo de energia para eletrólise	50 kWh/kg	IRENA (2018)
Consumo de energia para purificação da água, compressão e perdas do sistema	3 kWh/kg	IRENA (2018)
Eficiência de conversão	76%	O’Kelly-Lynch (2019)
Limite inferior de potência	5% da Potência Total	Dihn et al (2020)

Fonte: Adaptado de IRENA (2018), O’Kelly-Lynch (2019) e Dihn et al (2020)

A metodologia utilizada para quantificar o hidrogênio produzido a partir do potencial eólico foi baseada no estudo realizado por Dihn *et al* (2020). A Equação 2 apresenta a quantidade de hidrogênio teoricamente produzida ($M_{H2_teorico}$) por hora a partir da fazenda eólica varia ao longo do tempo. A eletricidade consumida pelo eletrolisador por quilograma de hidrogênio é representada por E_{ele} (MWh/kg), que é fornecida nas especificações do fabricante do eletrolisador. A eletricidade consumida para purificação da água, compressão de hidrogênio na pressão de produção para a pressão de armazenamento e outras perdas é denotada como E_p (MWh/kg). η_{ele} é a eficiência de conversão.

$$M_{H2_teorico} = \frac{P_{parque}(t) * 1 \text{ hora}}{\frac{E_{ele}}{\eta_{ele}} + E_p} \text{ [kg/hora]} \quad (2)$$

A capacidade nominal da planta de eletrólise de hidrogênio deve ser decidida com base na produção máxima de hidrogênio por hora, conforme a Equação 3, multiplicada pela capacidade disponível da pilha de eletrólise.

$$P_{H2} \leq \max M_{H2_teorico} \times E_{ele} \text{ [MW]} \quad (3)$$

Após definido o tamanho da planta, a quantidade prática de hidrogênio produzida é governada pelas equações abaixo:

$$M_{H2_real} \left[\frac{kg}{h} \right] \begin{cases} 0 & \text{se } P_{parque} < 0,05 * P_{h2} \\ \frac{P_{parque}(t)}{\frac{E_{elec}}{n_{conv}} + E_p} & \text{se } P_{parque} < P_{h2} + M_{H2_prático} * E_p \\ \frac{P_{H2}}{E_{elec}} \cdot n_{conv} & \text{se } P_{parque} \geq P_{h2} + M_{H2_prático} * E_p \end{cases} \quad (4)$$

onde,

$$M_{H2_prático} = \frac{P_{H2}}{E_{elec}} \cdot n_{conv} \quad (5)$$

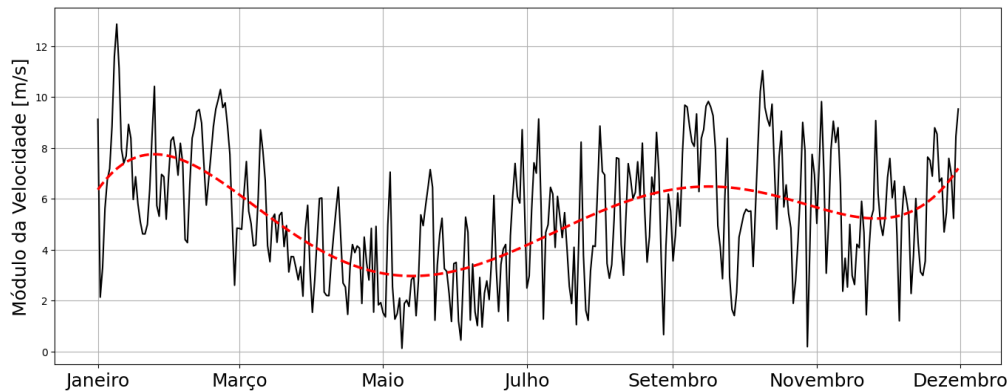
Assim, tem-se que a produção real de H₂ será limitada à potência fornecida pelo parque eólico caso a potência de saída do mesmo não seja suficiente para suprir a planta de eletrólise mais os processos de purificação da água e compressão de H₂. A produção será limitada ao tamanho definido para planta de eletrólise caso a potência de saída do2 parque supere a potência da planta de eletrólise mais a energia necessária para purificação da água e compressão do H₂.

4. RESULTADOS

4.1 Recurso Eólico

Após tratamento dos dados de reanálise, verificou-se a completude dos dados, não havendo lacunas ou valores ausentes na série temporal. Para uma melhor análise da sazonalidade do recurso eólico, construiu-se um ano médio, o qual é constituído pela média horária de todos os dias constituintes dos anos analisados. O resultado dessa condensação de dados é apresentado na Figura 8.

Figura 8– Módulo da velocidade de vento em 100m para ano médio

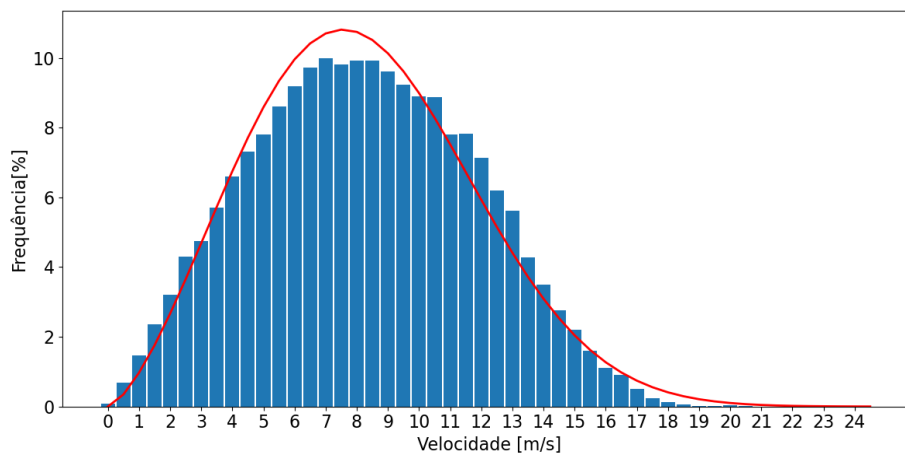


Fonte: Autoras (2023)

Analisando-se os gráficos, pode-se observar que a velocidade média do vento na região a uma altura de 100 m fica entre 8 e 10 m/s. Para 150 m, correspondente à altura de *hub* da turbina, o valor calculado pelo WAsP foi de 13,03 m/s para uma rugosidade de terreno de 0,000 3m. Percebe-se então que os meses de março a julho apresentam as menores velocidades médias de vento e, portanto, a produção de energia será menor nesses meses.

A distribuição de Weibull é uma distribuição de probabilidade contínua que descreve a probabilidade de ocorrência de diferentes velocidades do vento em uma determinada área em um determinado momento. Na Figura 9 é possível observar a distribuição de Weibull para as velocidades de vento do local estudado a 100 m de altura.

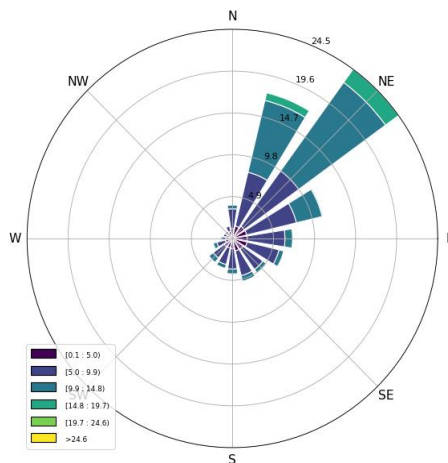
Figura 9 – Histograma da ocorrência de velocidade e curva de distribuição de Weibull a 100m de altura



Fonte: Autoras (2023)

Observando-se a distribuição de Weibull, verifica-se uma significativa incidência de velocidade superior a 11 m/s, que corresponde a velocidade nominal do aerogerador escolhido. A rosa dos ventos das direções predominantes de incidência de vento é apresentada na Fig. 10 e analisando-a percebeu-se que o vento incide majoritariamente no setor 2 representando 24,5% das ocorrências e 1, representando 17,7% das vezes. Dessa forma, o melhor posicionamento das turbinas é alinhado a 45° do norte geográfico para um melhor aproveitamento do recurso eólico.

Figura 10 - Rosa dos Ventos



Fonte: Autoras (2023)

4.2 Produção de Energia Elétrica

As simulações foram realizadas utilizando-se o modelo para cálculo de esteira PARK-2 – o mais indicado para ambiente marítimo (DTU, 2021). A constante de decaimento do efeito de esteira em aplicações offshore é recomendada ter um limite inferior de $k = 0,04$ (DTU, 2021). A Tabela 5 reúne os principais resultados obtidos na simulação

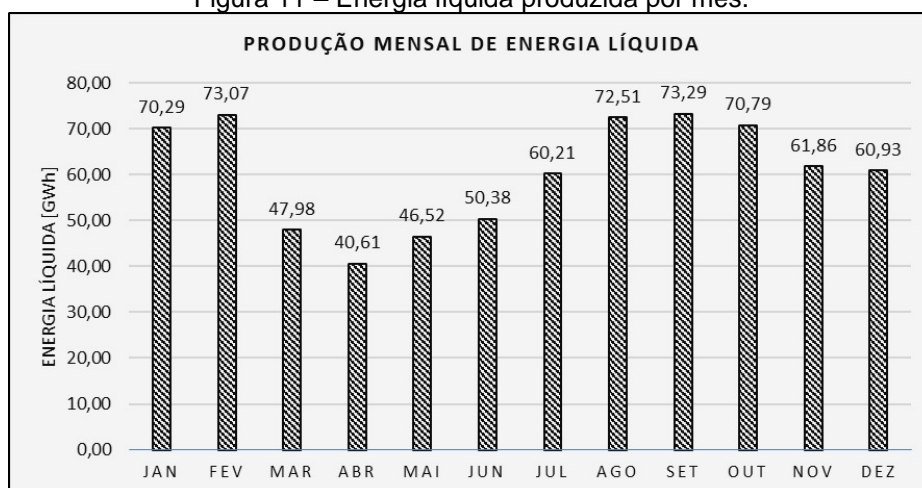
Tabela 5– Produção de energia elétrica

Produção Anual de Energia - Bruta	138,919 GWh
Produção Anual de Energia - Líquida	126,88 GWh
Perdas Proporcionais por Efeito Esteira	1,05%
Fator de Capacidade Médio	54,4%
Densidade de Potência	118 W/m ²

Fonte: Autoras (2023)

As perdas por efeito esteira foram baixas devido à uniformidade do terreno local e da distribuição perpendicular dos aerogeradores em relação à direção do vento predominante. O fator de capacidade do parque ficou acima da média dos parques offshore existentes, os quais apresentam o valor médio de 41% (IRENA, 2021). Na Figura 11 é apresentada a energia líquida produzida por mês. Devido à sazonalidade do vento na região, a produção de energia cai em torno de 38% no período de março a maio.

Figura 11 – Energia líquida produzida por mês.



Fonte: Autoras (2023)

4.3 Produção de Hidrogênio Verde

Mathur *et al.* (2008) mostraram em seu estudo que 100 MW representa a capacidade mínima para produção de hidrogênio economicamente viável usando energia eólica offshore, dessa forma, o parque será composto de 10 aerogeradores do modelo apresentado na Tabela 3 – totalizando um parque eólico de 150 MW. Aplicando-se a Equação 6, a produção máxima de hidrogênio teórica é de 2642,54 kg/hora – ou seja, caso a potência fornecida pelo parque fosse a potência nominal do mesmo, resultaria em uma planta de 132,12 MW.

Assim, o tamanho da planta de hidrogênio foi fixado em 130 MW. Utilizando-se toda energia anual líquida produzida pelo parque eólico na eletrólise, foi obtida uma produção de 12.805.425 kg de hidrogênio por ano. A Tabela 6 apresenta os principais resultados encontrados.

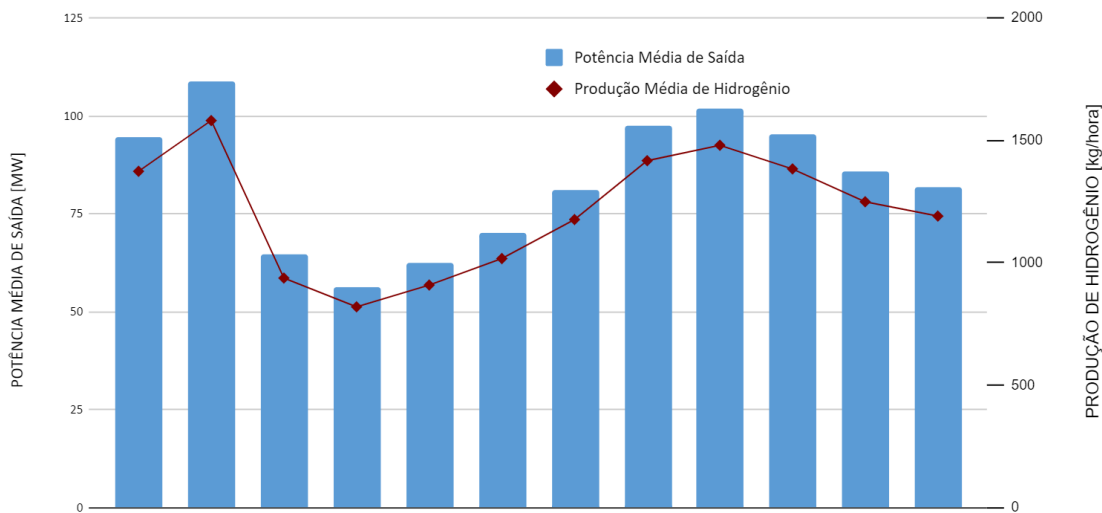
Tabela 6 – Resultados para Planta de Hidrogênio

Potência da Planta de H ₂	130 MW
Potência Mínima para Eletrólise	6,5 MW
Produção Média Horária de Hidrogênio	1209,56 kg/hora
Produção Anual Líquida de Hidrogênio	10.595.807,19 kg

Fonte: Autoras (2023)

Na Figura 12 é apresentada a potência de saída média do parque e a respectiva produção horária estimada para a planta de hidrogênio. A maior produção média horária foi no mês de fevereiro, com um valor de 1600 kg/hora. Foi observado também que em nenhum dos meses a potência média de saída do parque foi superior a potência da planta de hidrogênio.

Figura 12 - Produção anual líquida de hidrogênio verde considerando que toda potência elétrica gerada no parque eólico *offshore* seja dedicada a este processo.



Fonte: Autoras (2023)

Após obtenção da produção de hidrogênio verde através de equações analíticas, foi feita uma validação dos resultados simulando o mesmo sistema no software *Hyjack*. O simulador, proposto pela startup *HyjackTech* procura proporcionar a disseminação do conhecimento sobre as soluções voltadas ao mercado do hidrogênio. Assim, o usuário atribui um valor de potência ao eletrolisador, seleciona a tecnologia praticada (AEL, PEM ou SOE) e o simulador fornece tanto a quantidade de água quanto a demanda de energia elétrica necessárias, de acordo com o fator de capacidade da máquina. (Hyjack, 2021). A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para uma potência de 130 MW e um fator de capacidade de 54,4%, correspondendo ao fator de capacidade do parque eólico.

Tabela 7 – Resultados para Planta de Hidrogênio conforme software *Hyjack*

Potência da Planta de H ₂	130 MW
Fator de Capacidade da Planta	54,4%
Consumo de Energia Elétrica Anual	614 GWh
Produção Média Horária de Hidrogênio	1382 kg/hora
Produção Anual de Hidrogênio	11.868.920 kg

Fonte: Autoras (2023)

Os valores simulados são próximos aos calculados de forma analítica, apresentando um acréscimo de 12% na produção anual líquida de hidrogênio. O consumo anual de energia da planta simulada aponta para um excesso de energia de aproximadamente 112 GWh anuais.

5. CONCLUSÃO

O local escolhido apresentou um recurso eólico com uma média de velocidade de vento de 13,05 m/s para e a 150 m de altura. Após a compilação de cinco anos de dados em um ano médio, tornou-se evidente a existência de sazonalidade na região. Durante os meses de março a junho, os valores de velocidade foram observados em níveis inferiores, enquanto os meses de setembro a novembro apresentaram velocidades mais elevadas. Ademais, a direção do vento é predominantemente nordeste, o que facilitou a construção do layout do parque. A produção de energia anual de aproximadamente 730 GWh e o fator de capacidade médio

de 54,4% reforçou o grande potencial energético da área. As perdas por efeito esteira de 1,65% são extremamente baixas quando comparado com valores usuais de parques operantes de 10 a 20%, isso se deve à união do vento uniforme com o *layout* do parque em apenas uma fileira, ressaltando mais uma vantagem de se trabalhar no ambiente offshore: a grande disponibilidade de área inexplorada.

Aproveitando toda a energia gerada pelo parque eólico para a produção de hidrogênio, a planta de eletrólise tem uma capacidade estimada de produção de 10.595.807,19 kg por ano, o que equivale a uma média de 1209,56 kg por hora, sendo assim uma quantidade significativa para suprir a demanda do mercado de hidrogênio. A produção local de hidrogênio e sua conversão em amônia podem desempenhar um papel crucial na produção de fertilizantes nitrogenados nacionais, reduzindo a dependência do Brasil em relação a fontes externas. Além disso, devido à sua localização estratégica, o hidrogênio produzido pode ser aproveitado nos próprios processos de extração e refino de petróleo, que atualmente correspondem a cerca de 35% da demanda global por essa substância.

Assim, a partir da análise técnica realizada ficou evidente que a implementação de projetos de energia eólica offshore no Brasil associado à produção de hidrogênio pode contribuir para o processo de transição energética do país além de apresentar uma grande oportunidade para atrair investimentos, gerar empregos e promover o desenvolvimento econômico em diversos estados produtores.

6. AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem ao NIEPIEE – Núcleo de Integração de Estudos, Pesquisa e Inovação em Energia Eólica da UFRGS e ao Consórcio de LIBRA/Petrobras pelo apoio técnico na realização deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica (Brasil) . **Boletim Anual de Geração Eólica 2021**. 2021. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/>>. Acesso em: 15 Agosto. 2022.

ACAR, C.; DINCER I. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *Hydrogen Energy*, v. 39, p. 1-12, 2013.

AGÊNCIA PETROBRAS (Brasil) (org.). **Projeto Conceito FPSO PL**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional-e-meio-ambiente/arq/ppdi/pdi-conceitual-fps0-spa2.pdf>>. Acesso em: 18 setembro 2022.

BRAGA, Carolina Bordini. **Avaliação do Desempenho no Ponto de Projeto de Turbinas a gás em operação na Bacia de Campos**. 2013. 74 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Centro de Tecnologia Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

BVG associates, “**Wind farm costs Offshore Renewable Energy**,” BVG associates, 10 04 2020. [Online]. Disponível em <<https://guidetoanoffshorewindfarm.com/wind-far>>.

CALADO, G. CASTRO, R. **Hydrogen production from offshore wind parks: Current situation and future perspectives**. *Applied sciences* (Basel, Switzerland), v. 11, n. 12, p. 5561, 2021.

DE OLIVEIRA, R. C. D. E. O. C. **Panorama do hidrogênio no brasil**. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2022.

DINH et al. **Development of a viability assessment model for hydrogen production from dedicated offshore wind farms**. Irlanda. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Geração Eólica 2021**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt>> Acesso em: 20 de julho de 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Produção e Consumo de Hidrogênio em Refinarias no Brasil**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt>> Acesso em: 20 de março de 2023.

ESTEBAN, M. D. et al. **Why offshore wind energy?** *Renewable Energy*, v. 36, n. 2, p. 444–450, fev. 2011.

European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. **ERA5 Dataset**. Disponível em: <<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>> Acesso em: 10 julho 2022.

FRANCO, B. A. et al. **Assessment of offloading pathways for wind-powered offshore hydrogen production: Energy and economic analysis**. *Applied energy*, v. 286, n. 116553, p. 116553, 2021.

Gaertner, E., Rinker J., Sethuraman L., Zahle F., Anderson, B., Barter, G., Abbas, N., Meng, F., Bortolotti, P., Skrzypinski, W., Scott, G., Feil, R., Bredmose, H., Dykes, K., Shields, M., Allen, C., e Viselli.A. 2020. **Definition of the IEA 15-Megawatt Offshore Reference Wind**. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-75698. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75698.pdf>

Glenk, G., Reichelstein, S. Economics of converting renewable power to hydrogen. *Nat Energy* 4, 216–222 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0326-1>.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global Wind Report 2022**. Disponível em: <<https://gwec.net/global-wind-report-2022/>> Acesso em: 20 de agosto de 2022.

GOMES, J. **Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio**, *Rev. Ciência Elem.*, V10(2):025, 2022.

HOSSEINI, S. E.; WAHID, M. A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, v. 57, p. 850–866, 2016.

IEA. *The Future of Hydrogen*. Paris: IEA; 2019.

IEA. *G20 Hydrogen report: assumptions*. Paris: IEA; 2019.

IEA. *Global Hydrogen Review*. Paris: IEA, 2022.

IRENA. **Hydrogen from Renewable Power: Technology Outlook for the Energy Transition. 2018**. Disponível em: < <https://irena.org/publications/2018/Sep/Hydrogen-from-renewable-power>> Acesso em: 22 Agosto de 2022.

LÉVIN, D. B.; CHAHINE, R. Challenges for renewable hydrogen production from biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 35, p. 4962–4969.

LETCHER, T. M. **Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines**. [s.l.] Joe Hayton, 2017.

OCYAN. Pioneiro de Libra completa um ano de operação com mais de 9 milhões de barris produzidos. Disponível em: <https://www.ocyan-sa.com/pt-br/pagina-release/pioneiro-de-libra-completa-um-ano-de-operacao-com-mais-de-9-milhoes-de-barris>. Acesso em: 18 Setembro 2022

PAULINO, Regina Franciélle Silva. **USO DO BIOGÁS PARA PRODUÇÃO DE BIOHIDROGÊNIO: ELETROLISE VERSUS REFORMA A VAPOR**. 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2017.

ULLEBERG Y., Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 28, p. 21–33, 2003.

WAsP (2017) (Educational Licence). **Wind Atlas Analysis and Application Program**. DTU Wind Energy.

VIOLA, Luigi. **ESTUDO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO A PARTIR DE FONTES EÓLICA, SOLAR E HIDRELÉTRICA**. 2015. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

Xuzhou Huayan Gas Equipment Co., Ltd., **Diaphragm Industrial Heavy Duty Oxygen Compressor**, Xuzhou; 2020.