

CATEGORIA 6

Miscelâneas



Fabricação de tijolos ecológicos com resíduos de PET da indústria de pás eólicas

Juliana de Almeida Yanaguizawa Lucena¹

1 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – *Campus Ipojuca*

julianaalmeida@ipojuca.ifpe.edu.br

RESUMO

A energia eólica é uma fonte limpa e renovável de geração de eletricidade que tem ganhado destaque globalmente devido à sua contribuição na redução das emissões de gases de efeito estufa e na diversificação da matriz energética. No entanto, a produção de pás de turbinas eólicas gera resíduos de núcleos estruturais, incluindo o polietileno tereftalato (PET) e a madeira de balsa. Mesmo sendo um resíduo classe-II, o volume mensal descartado por uma fábrica de kits eólicos em Pernambuco, por exemplo, chega a 155 mil litros (17 toneladas) de espuma de PET e 73 mil litros de madeira de balsa (11 toneladas). O PET, apesar de inerte, pode levar aproximadamente 400 anos para se decompor na natureza. Este estudo investigou a viabilidade de reciclar o resíduo de PET da indústria de pás eólicas para fabricação de tijolos ecológicos (de solo-cimento), como alternativa ao seu descarte em aterro sanitário. O resíduo de PET eólico foi incorporado em pó na fabricação de tijolos ecológicos, em 7 diferentes formulações. Como resultado, verificou-se que os tijolos aditivados com PET atenderam aos requisitos de resistência à compressão e absorção de água das normas ABNT NBR 8491/2012 e NBR 8492/2012. Houve redução de 18,5% no custo de materiais e de 12% na densidade dos tijolos aditivados com PET em comparação com os tijolos ecológicos originais. Assim, o tijolo ecológico com resíduo de PET foi considerado um produto sustentável, contribuindo para a economia circular da indústria eólica. A continuidade dos estudos é necessária para aprimorar as formulações testadas.

Palavras-chaves:

Energia eólica; Aerogeradores; Pá eólica; Reciclagem de PET; Economia circular; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Wind energy is a clean and renewable source of electricity generation that has gained global prominence due to its contribution to reducing greenhouse gas emissions and diversifying the energy matrix. However, the production of wind turbine blades generates waste structural cores, including polyethylene terephthalate (PET) and balsa wood. Even though they are class-II waste, the monthly volume discarded by a wind kit factory in Pernambuco, for example, reaches 155 thousand liters (17 tons) of PET foam and 73 thousand liters of balsa wood (11 tons). Despite being inert, PET polymer can take approximately 400 years to decompose in nature. This study investigated the feasibility of recycling PET waste from the wind blade industry to manufacture ecological bricks (soil-cement), as an alternative to its disposal in a landfill. Wind PET waste was incorporated into powder in the manufacture of ecological bricks, in 7 different formulations. As a result, it was found that the bricks with PET additives met the compressive strength and water absorption requirements of the ABNT NBR 8491/2012 and NBR 8492/2012 standards. There was a reduction of 18.5% in the cost of materials and a 12% reduction in the density of bricks with PET additives compared to the original ecological bricks. Thus, the ecological brick with PET waste was considered a sustainable product, contributing to the circular economy of the wind industry. Continuity of studies is necessary to improve the tested formulations.

Keywords:

Wind energy; Wind turbines; Wind blade; PET recycling; Circular economy; Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Uma turbina eólica comercial é um equipamento robusto que integra alta tecnologia e milhares de dispositivos e componentes para gerar eletricidade a partir do vento. No estado de Pernambuco, importantes fabricantes de componentes de aerogeradores estão concentrados no Complexo Industrial e Portuário de Suape, atendendo as demandas dos parques eólicos atuais e em construção, principalmente na Bahia, Rio Grande do Norte e Ceará.

Em trabalhos anteriores [1-2] foi apresentado que a produção de pás eólicas se caracteriza por um sistema complexo de fabricação por projetos, possuindo muitos processos manuais que dificultam a padronização e o controle de qualidade. Armazenagem e cadeia de suprimentos também são alguns desafios na gestão da produção devido às grandes dimensões das pás (superior a 80 metros de comprimento) exigidas nos projetos atuais.

Por esta razão, pás eólicas de grande porte são feitas de compósito, um material avançado de Engenharia amplamente utilizado em diversas aplicações de alto desempenho, como aeroespacial, construção civil, automobilística, naval e eólica, devido às suas excelentes propriedades mecânicas e químicas, substituindo materiais convencionais, como o aço. Placas de madeira balsa e espumas sintéticas, como as de polietileno tereftalato (PET), são colocadas como núcleo estrutural (material de enchimento) nas pás de turbinas eólicas, por serem leves e resistentes mecanicamente [1-2].

Desde 2021, um projeto de extensão tecnológica desenvolvido no Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) tem constatado que uma fábrica de kits eólicos produz 28 toneladas/mês de resíduos de núcleo estrutural de pás eólicas (Figura 1), oriundos de seu processo de usinagem. Por não haver até o momento uma tecnologia para sua reciclagem, o destino deste resíduo é o aterro sanitário (resíduo classe II). Isso corresponde a um volume mensal de 155 mil litros de espuma de PET e 73 mil litros de madeira balsa nos aterros. Apesar de inerte, quando depositado em aterros, o PET pode levar aproximadamente 400 anos para se decompor [3].

Figura 1. Resíduos de núcleo estrutural de pás eólicas gerados na fábrica de kits eólicos em Pernambuco, destinados em aterro sanitário: (a) Madeira de balsa (11 t/mês). (b) Espuma de PET (17 t/mês).



Fonte: [3].

Nesse sentido, este trabalho objetivou estudar a viabilidade de reciclagem do resíduo de PET da indústria de pás eólicas para fabricação de tijolos ecológicos (tijolos de solo-cimento), como alternativa ao seu descarte em aterro sanitário.

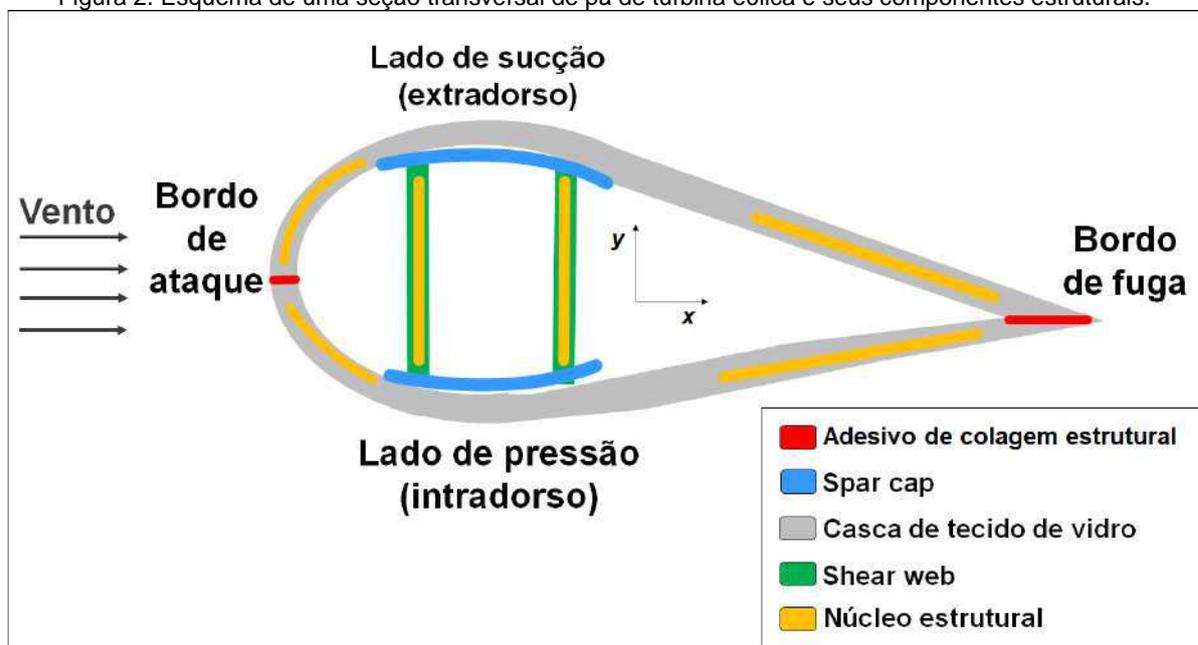
2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Materiais de núcleo estrutural de pás de turbinas eólicas

Os materiais de núcleo estrutural são essenciais na fabricação das pás de turbinas eólicas. Eles desempenham um papel crucial na resistência mecânica, durabilidade e eficiência dessas pás. Consistem em placas colocadas dentro das cascas das pás (Figura 2) para fornecer suporte estrutural, ajudando a manter o formato da pá e a distribuir as cargas mecânicas geradas pelo vento.

A madeira de balsa e a espuma de polietileno tereftalato (PET) são os materiais de núcleo estrutural mais utilizados como enchimento nas pás das turbinas eólicas, por sua combinação de leveza e resistência. Eles permitem que as pás sejam eficientes em termos de peso, facilitando a rotação e minimizando o estresse nas estruturas. Também oferecem propriedades de isolamento térmico e acústico. Isso é importante para proteger os componentes internos da turbina contra variações de temperatura e ruídos. Ainda, ajudam a absorver e dissipar as vibrações geradas pelo vento. Isso contribui para a estabilidade e longevidade das pás.

Figura 2. Esquema de uma seção transversal de pá de turbina eólica e seus componentes estruturais.



Fonte: Adaptado de [1].

A balsa, como toda madeira, é por definição um polímero natural. É encontrada em abundância na Floresta Amazônica, sendo o Equador o principal fornecedor para o setor eólico mundial. É um material leve (150 kg/m^3) e de boa resistência mecânica. Em alternativa ao descarte em aterros, quando possível, é feita a doação para cimenteiras, que utilizam a madeira balsa como combustível para queima em seus fornos. No entanto, estas empresas nem sempre estão localizadas próximas às fábricas de pás eólicas, tornando altos os custos logísticos (frete) arcados pela geradora e a doação acaba sendo inviável [3].

Já a espuma de PET é um polímero sintético e termoplástico (que se funde com o calor), bem conhecido pela sua utilização em garrafas de bebidas. Não somente é reciclável, como também é o plástico mais reciclado em todo o mundo [4, 5], porém de difícil biodegradação e por isso sua disposição final em aterros sanitários torna-se um problema.

O núcleo estrutural de PET utilizado pela empresa de kits eólicos (Figura 3) é adquirido de dois fornecedores internacionais [6, 7] na densidade de 100 kg/m^3 . Um deles, inclusive, utiliza uma tecnologia patenteada de processo para a produção de espumas a partir de garrafas de bebidas PET pós-consumo.

Figura 3. Espuma de PET utilizada como núcleo estrutural de pás eólicas em Pernambuco: (a) Usinagem das placas em máquinas CNC. (b) Pó da espuma de PET coletados no sistema de exaustão das máquinas CNC.



Fonte: [3].

A Tabela 1 apresenta as principais propriedades físicas e mecânicas da espuma de PET, onde pode-se observar que o material apresenta características interessantes, como: fácil processamento com todos os tipos de processos de laminação e resinas eólicas, temperatura de processamento de até 150°C, excelente resistência a fadiga, alta estabilidade química, estabilidade térmica a longo prazo, sem absorção de água, reciclado e reciclável. A baixa densidade dos núcleos de PET deve-se à estrutura de células fechadas resultante da injeção de um gás inerte no processamento do material plástico.

Tabela 1. Principais propriedades físicas e mecânicas de espuma de PET (polietileno tereftalato) empregada como núcleo estrutural de pás de turbinas eólicas.

Característica	Tipo de espuma de PET	
	ARMAPET STRUCT GR 100	AIREX T92.100
Fornecedor	Armacell	Airex
Densidade [kg/m ³]	100	100
Resistência à compressão [MPa]	1,50	1,75
Módulo de compressão [MPa]	160	90
Módulo de cisalhamento [MPa]	21	23
Módulo de Young [MPa]	120	110
Tensão de tração [MPa]	2,5	2,3
Condutividade térmica a 23° C [W/(m.K)]	0,034	0,034

Fonte: Adaptado de [6, 7].

2.2 Tijolos ecológicos para construção civil sustentável

A fabricação tradicional de tijolos cerâmicos (tijolo de 8 furos, ou tijolo baiano) depende da queima de argila em fornos a altas temperaturas, muitas vezes alimentados por combustíveis fósseis não renováveis, como carvão ou gás natural. Além disso, o processo de transporte aumenta significativamente seu impacto ambiental, por serem tijolos pesados e volumosos.

Os tijolos de solo-cimento (os chamados tijolos ecológicos ou blocos de terra compactada) são materiais de construção alternativos, que oferecem menor impacto ambiental e maior sustentabilidade, por utilizarem matérias primas locais e dispensarem o processo de queima, mantendo muitas das qualidades intrínsecas dos tijolos tradicionais.

Os tijolos ecológicos geralmente são compostos por subsolo inorgânico seco, argila não expansiva, agregados e cimento Portland. Ao longo dos anos, diversas técnicas foram desenvolvidas para otimizar a

produção e utilização destes materiais, incluindo melhores seleções do solo, porcentagens de ligantes, métodos de compressão e técnicas de cura. Para tal, a escolha do solo adequado é fundamental, sendo o arenoso com teor de areia superior a 50% e de argila entre 20 e 30% o mais indicado [8].

O processo de fabricação é bastante simples e se inicia com a preparação do solo e a mistura com uma pequena proporção de cimento, onde água é adicionada gradualmente até atingir-se a consistência desejada. Em seguida, a mistura de solo e cimento é compactada por meio da prensa, exercendo pressão para formar tijolos maciços, que podem ter furos ou não. Após compactados, os blocos são empilhados e deixados para curar sob uma lona ou cobertura plástica para reter a umidade essencial para uma cura adequada.

Os tijolos ecológicos costumam ser mais baratos de produzir em comparação com os tijolos cerâmicos tradicionais, apresentam resistência e durabilidade impressionantes, garantindo estruturas duradouras e resistentes às diversas condições climáticas. Podem trabalhar como estruturas autoportantes, permitindo a passagem de barras de aço e ocultando encanamentos e conduítes elétricos. O controle de qualidade é essencial para garantir a integridade estrutural dos blocos, exigindo a seleção cuidadosa do solo, proporções precisas de cimento e métodos adequados de cura.

3. MÉTODO DO ESTUDO

O resíduo de espuma de PET foi disponibilizado por uma fabricante de kits eólicos em Pernambuco, parceira do projeto no IFPE, que adquire o material em forma de placas e realiza diversas operações de usinagem em máquinas CNC, como cortes, furos, chanfros e sulcos, de modo a montar kits de núcleo estrutural para pás eólicas em tamanhos e quantidades segundo especificações técnicas do projeto da pá eólica de seus clientes. O resíduo de PET foi coletado em forma de pó do sistema de exaustão das máquinas de usinagem CNC, como mostrado na Figura 1 da seção anterior.

O PET em pó foi incorporado na fabricação de tijolos ecológicos em 7 tipos de formulações, conforme apresentado na Tabela 2. A confecção dos tijolos foi feita em uma olaria parceira do projeto localizada em Escada-PE, totalizando 146 tijolos produzidos (Figura 4).

Tabela 2. Formulações de tijolos ecológicos produzidas com resíduo de PET em pó da indústria eólica.

Formulação nº	Cimento*	Areia*	Argila*	Água (L)	Pó de PET*	Quant. tijolos produzidos
1	1	3	3	8	0	28
2	1	3	1	8	1	32
3	1	3	1	4	2	33
4	1	3	0	8	3	0
5	1	2	1	8	3	26
6	1	1	1	15	4	24
7	1	0	1	15	5	3

* Medida em balde de 18L. Fonte: A autora (2024).

Em seu processo tradicional de fabricação do tijolo ecológico (formulação nº1 da Tabela 1), os materiais empregados na olaria parceira são: cimento, areia e argila (1:3:3), onde cada traço de massa é composto por 1 parte de cimento Portland (CPII), 3 partes de areia e 3 partes de argila, onde cada parte corresponde a um balde de 18 litros de capacidade. Para essa quantidade de sólidos, utiliza-se aproximadamente 10 litros de água. Este traço rende 28 tijolos, sendo possível atingir uma produção de 300 tijolos/hora. Após a fabricação dos tijolos, aguardou-se o período de 28 dias para a cura dos tijolos antes do início dos testes.

Os testes de resistência mecânica à compressão e de absorção de água foram conduzidos conforme as normas ABNT NBR 8491/2012 [9] e ABNT NBR 8492/2012 [10], no Laboratório de Química do IFPE *Campus Ipojuca* e Laboratório de Mecânica do IFPE *Campus Recife*. O volume dos tijolos foi obtido pelas medidas das dimensões dos tijolos com paquímetro e a massa obtida em balança digital. Os tijolos foram secos em estufa a 140°C antes do teste de imersão em água, ficando submersos por 24 h e, após este período, a massa dos tijolos foi novamente mensurada.

Figura 4: Fluxograma do processo utilizado neste trabalho para fabricação e caracterização tijolos ecológicos aditivados com resíduo de PET em pó da indústria de pás eólicas.



Fonte: A autora (2024).

Também foi feito o cálculo do custo de materiais para a produção dos tijolos aditivados com PET, para fins de comparação com os tijolos ecológicos na formulação original, levando-se em consideração seus respectivos rendimentos (quantidade produzida em cada formulação). Os custos das matérias-primas (cimento, areia e argila) foram coletados diretamente com a olaria parceira no projeto. Os custos de aquisição do PET foram considerados nulos, por se tratar de um resíduo doado pela empresa geradora. O custo da água também foi desconsiderado.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Figura 5 mostra os 146 tijolos produzidos de acordo com as diferentes formulações apresentadas na Tabela 1. As formulações nº 4 e 7 foram desconsideradas pois geraram tijolos muito moles e a desmoldagem da prensa foi prejudicada.

Figura 5. Tijolos ecológicos produzidos com adição do PET eólico em diferentes formulações, sendo molhados no processo de cura de 7 dias.



Fonte: A autora (2024).

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos no ensaio de absorção de água, conduzidos segundo a norma NBR 8492/2012, que preconiza que os tijolos apresentem um ganho de massa de, no máximo, 20%, após imersos em água por um período de 24 horas. Assim, todas as formulações testadas foram aprovadas nesse critério. Mesmo os tijolos que apresentaram trincas superficiais inerentes ao processo de fabricação, que poderiam servir de armadilhas de água, foram aprovados no ensaio. Foi o caso das formulações nº 5 e nº 6.

Tabela 3. Resultados do ensaio de absorção de água em tijolos ecológicos aditivados com resíduo de PET da indústria de pás eólicas. A norma ABNT NBR 8492/2012 exige ganho máximo de 20% de massa.

Formulação nº	Massa tijolo seco (g)	Massa após 24h imersão (g)	Ganho de massa (%)
1	3190	3595	12,70
2	3250	3605	10,92
3	3085	3535	14,59
5	2785	3300	18,49
6	2770	3295	18,95

Fonte: A autora (2024).

O cálculo do custo de materiais para a produção dos tijolos aditivados com PET está apresentado na Tabela 4, para fins de comparação com os tijolos ecológicos na formulação original (Formulação nº1). Com base nos cálculos realizados, que levou em consideração os custos de aquisição das matérias-primas (cimento, areia e argila) e a quantidade de tijolos produzidos em cada formulação, identificou-se que a Formulação nº 3 – que substitui 2 medidas de argila por 2 medidas de PET – apresentou o menor custo unitário dentre todas as formulações testadas (R\$ 0,75), ficando 18,5% mais barata e 12% mais leve (densidade de 1,28 g/cm³) em relação à formulação original (Formulação nº 1). O menor valor de densidade obtido foi de 1,11 g/cm³, correspondente à Formulação nº 6 – que substituiu 2 medidas de areia e 2 de argila por 4 medidas de PET.

Considerando a densidade do PET como sendo 100kg/m³, e que a melhor formulação (nº 3) consome 36 litros de PET e produz 33 tijolos, temos que o volume mensal de resíduo de PET descartado pela empresa em estudo é suficiente para produzir cerca de 155,8 mil tijolos ecológicos, o que corresponde a mais de 2.500m² de área edificada.

Tabela 4. Custos de materiais para a fabricação de tijolos ecológicos tradicionais (Formulação nº 1) em comparação aos tijolos aditivados com pó de PET da indústria eólica (Formulações nº 2, nº 3, nº 5 e nº 6).

Formulação nº	1	2	3	5	6
Cimento (R\$ 17,50/ balde)	1x17,50= R\$ 17,50				
Areia (R\$ 2,18/ balde)	3x 2,18= R\$6,54	3x 2,18= R\$6,54	3x 2,18= R\$6,54	2x 2,18= R\$4,36	1x2,18= R\$2,18
Argila (R\$0,57/ balde)	3x0,57= R\$1,71	1x 0,57= R\$0,57	1x 0,57= R\$0,57	1x 0,57= R\$0,57	1x 0,57= R\$0,57
Pó de PET eólico (R\$0,00/ balde)	0x0,00= R\$0,00	1x 0,00= R\$0,00	2x0,00= R\$0,00	3x0,00= R\$0,00	4x0,00= R\$0,00
Volume (cm ³)	2207	2292	2415	2422	2496
Massa (g)	3190	3250	3085	2785	2770
Densidade (g/cm ³)	1,45	1,42	1,28	1,14	1,11
Custo total	R\$ 25,75	R\$24,61	R\$ 24,61	R\$22,43	R\$20,25
Rendimento por traço	28 unids	32 unids	33 unids	26 unids	24 unids
Custo unitário:	R\$0,92	R\$0,77	R\$ 0,75	R\$0,86	R\$0,84

Fonte: A autora (2024).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Embora a eólica seja uma fonte limpa e renovável de energia, é necessário que toda a cadeia produtiva do setor seja sustentável. Isso significa que a indústria de pás eólicas precisa destinar o refugo de seus processos de fabricação de forma a minimizar os impactos ambientais de uma possível poluição causada pelas matérias primas de origem fóssil, como é o caso dos núcleos estruturais de PET das pás de aerogeradores.

Mesmo sendo um resíduo classe II, vale lembrar que este estudo identificou um volume mensal de 155 mil litros de espuma de PET descartados na natureza por apenas uma empresa fornecedora de kits para pás eólicas no Brasil.

A incorporação de resíduo de PET em pó da indústria eólica na produção de tijolos ecológicos mostrou-se uma alternativa economicamente viável. Dentre as diferentes formulações testadas, o menor custo unitário obtido (R\$ 0,75) foi 18,5% menor e 12% menos denso do que a formulação do tijolo ecológico original, ao substituir 2 medidas de argila por 2 de pó de PET eólico.

Tecnicamente, até o momento os tijolos aditivados com PET estão conforme a norma NBR 8492/2012, apresentando menos de 20% de ganho de massa após 24h imersos em água. Os resultados dos ensaios mecânicos de resistência à compressão estão em andamento e neste trabalho não são conclusivos.

O tijolo ecológico aditivado com PET pode, portanto, ser considerado inovador, por não haver até o momento resultado semelhante encontrado na literatura nacional e, ao mesmo tempo sustentável, ao desviar resíduos de aterros sanitários e ser uma solução econômica vantajosa, com tijolos mais baratos e resistentes. Por serem mais leves, os custos logísticos também são reduzidos ao optar pelo tijolo aditivado com PET. Assim, a introdução do PET eólico na construção civil através da fabricação de tijolos ecológicos além de agregar valor ao produto, representa uma significativa contribuição para a economia circular, face ao uso dos tijolos queimados (tijolos de 8 furos), que ainda dominam as vendas na construção civil pelo seu menor custo que o tijolo ecológico tradicional.

A continuidade dos estudos para melhoria das formulações investigadas poderá consolidar ainda mais os benefícios desta abordagem, fortalecendo a sinergia entre a gestão de resíduos da indústria eólica e a sustentabilidade na construção civil.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece ao IFPE, pelo apoio na execução do projeto de extensão tecnológica; à FACEPE/SECTI-PE, pelo financiamento do projeto (ARC-0224-3.08/23); às empresas parceiras SIW Kits Eólicos Ltda. e OLARIA Tijolos Ecológicos.

REFERÊNCIAS

- [1] LUCENA, J.A.Y. Recent advances and technology trends of wind turbines. In: **Recent Advances in Renewable Energy Technologies**, Academic Press, 2021, p. 177-210, ISBN 9780323910934. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91093-4.00009-3>>. Acesso em: 29 jun. 2024.
- [2] LUCENA, J.A.Y.; LUCENA, K.A.A. Wind energy in Brazil: an overview and perspectives under the triple bottom line, **Clean Energy**, v. 3, n. 2, 2019, p. 69-84. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/ce/zkz001>>. Acesso em: 29 jun. 2024.
- [3] LUCENA, J. A. Y.; SILVA, J. D. Resíduo de Núcleo Estrutural de Pás Eólicas: do Aterro para a Reciclagem. **Anais... Brazil Wind Power Papers 2023**, p. 53-64, 2023. Disponível em: <<https://www.brazilwindpower.com.br/content/dam/markets/braz/brazil-windpower/pt/2024/pdfs/PAPERS-BWP-CATEGORIA6.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2024.
- [4] SARDA, P.; HANAN, J.C.; LAWRENCE, J. G.; ALLAHKARAMI, M. Sustainability performance of polyethylene terephthalate, clarifying challenges and opportunities. **Journal of Polymer Science**, v. 60, 2022, pp.7-31. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/pol.20210495>>. Acesso em: 28 jun. 2024.
- [5] BRIVIO, L.; TOLLINI, F. PET recycling: Review of the current available technologies and industrial perspectives. **Advances in Chemical Engineering**, v. 60, 2022, pp. 215-267. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/bs.ache.2022.09.003>>. Acesso em: 26 jun. 2024.
- [6] ARMACELL. **ArmaPET Sctruct GR**. Technical data. 2021. Disponível em: <www.armacell-core-foams.com>. Acesso em: 25 mar. 2024.
- [7] 3ACOMPOSITES. **Airex T92**. Core materials. Data sheet. 2022. Disponível em: <<https://www.3acorematerials.com/>>. Acesso em: 25 mar. 2024.
- [8] SOUZA, E. **O futuro sob nossos pés: tijolos de solo cimento e o caminho para uma construção sustentável**. 2024. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/1013227/o-futuro-sob-nossos-pes-tijolos-de-solo-cimento-e-o-caminho-para-uma-construcao-sustentavel>>. Acesso em 01 jul. 2024.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8491. Tijolo de solo-cimento: requisitos**. 2012, 9p.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8492. Tijolo de solo-cimento: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – método de ensaio**. 2012, 8p.

ESTUDOS DE VIABILIDADE E ACESSO AO GRID PARA USINAS EÓLICAS OFFSHORE NO BRASIL

Alef Cerutti, Maria Tereza Souza, Gustavo da Silveira Pereira, Matheus Assis, Marcelo Rupp, Renato Rodrigues, Fabiane Ferrão, Raquel Policarpo, Ninive Martins

Tractebel Engie - Brasil

alef.cerutti@tractebel.engie.com, mariateresa.souza@tractebel.engie.com,
gustavo.silveira@tractebel.engie.com, matheus.assis@tractebel.engie.com,
marcelo.rupp@tractebel.engie.com, renato.rodrigues@tractebel.engie.com,
fabiane.ferrao@tractebel.engie.com, raquel.policarpo@tractebel.engie.com,
ninive.martins@tractebel.engie.com

RESUMO

Este estudo tem como objetivo analisar a regulamentação brasileira, ainda em construção sobre usinas de energia eólica offshore e seu impacto no Sistema Interligado Nacional (SIN). Três regiões foram escolhidas para possíveis parques eólicos: Nordeste, Sudeste e Sul do Brasil. A pesquisa incluiu mapeamento das principais agências do setor elétrico e requisitos de conexão ao SIN. A legislação brasileira foi comparada com a internacional para energia eólica offshore de modo a identificar possíveis semelhanças e os melhores caminhos para a conclusão do marco legal, incluindo linhas de transmissão e licenciamento ambiental. Foram desenvolvidas análises de viabilidade para a conexão de três empreendimentos eólicos offshore de 2GW em cada região, considerando a capacidade do sistema de transmissão e evitando sobrecargas. Por fim o estudo apresenta cenários para a viabilidade de projetos offshore no Brasil, considerando a conexão à rede e restrições ambientais.

Palavras-chaves:

Eólica offshore; Transmissão; Transição energética; Regulatório; Viabilidade; Fluxo de potência

ABSTRACT

This study aims to analyze the Brazilian regulation, still under construction, regarding offshore wind farms and their impact on the National Interconnected System (SIN). Three regions were chosen for potential wind farms: Northeast, Southeast, and South Brazil. The research included mapping of key agencies in the electricity sector and requirements for connection to the SIN. Brazilian legislation was compared with international standards for offshore wind energy to identify possible similarities and the best paths for completing the legal framework, including transmission lines and environmental licensing. Feasibility analyses were developed for the connection of three 2GW offshore wind projects in each region,

considering the transmission system's capacity and avoiding overloads. Finally, the study presents scenarios for the feasibility of offshore projects in Brazil, considering grid connection and environmental restrictions.

Keywords:

Offshore wind; Transmission; Energy transition; Regulatory; Feasibility; Load flow.

1. INTRODUÇÃO

Este estudo tem como objetivo facilitar o entendimento e apresentar o estado atual da regulamentação brasileira sobre a implantação de usinas de energia eólica offshore no Brasil e avaliar os impactos da inserção no sistema de transmissão brasileiro, o SIN (Sistema Interligado Nacional). Devido à extensão da costa brasileira, foram selecionados 3 possíveis regiões para a alocação dos parques eólicos offshore, em diferentes submercados – Nordeste, Sudeste e Sul do Brasil.

Para isto, foram mapeadas as principais agências do setor elétrico brasileiro, trazendo uma avaliação regulatória dos requisitos de conexão ao SIN e a definição do ponto de inserção mais adequado entre os critérios estabelecidos.

Em relação a Legislação Brasileira para energia eólica offshore, buscou-se identificar como a Legislação Brasileira para energia eólica offshore vem sendo desenvolvi, levando em conta o funcionamento atual do Setor Elétrico Brasileiro e como o mercado internacional tem desenvolvido a indústria offshore. Para complementar, mapeou-se a legislação e regulação Brasileira que deverá ser utilizada em conjunto com a Legislação para Energia Eólica Offshore, como linhas de transmissão de energia e licenciamento ambiental. como linhas de transmissão de energia e licenciamento ambiental.

No âmbito técnico, foi desenvolvida uma análise da viabilidade da conexão de três possíveis empreendimentos eólicos offshore de 2GW cada nas regiões selecionadas, de modo a identificar as melhores alternativas para a conexão com o SIN. O principal critério de seleção foi a disponibilidade do sistema já existente ou planejado para escoar a energia que será produzida pelos parques, sem que ocorram sobrecargas em linhas e equipamentos acima dos limites normatizados.

Como resultado, este estudo fornece alternativas de cenários para a viabilidade de projetos eólicos offshore no Brasil, considerando a conexão à rede, suas restrições ao fluxo e licenciamentos ambientais.

2. METODOLOGIA

No presente estudo os itens previstos para o estudo regulatório estão apresentados no tópico 2.1 Roadmap para acesso ao SIN e os assuntos técnicos descritos no tópico 2.2 Análise de viabilidade do sistema elétrico. Para isto foi realizado uma extensa pesquisa em sites oficiais e plataformas do governo.

2.1. Roadmap para acesso ao SIN

Para análise dos assuntos regulatórios será avaliado o estado atual da regulação brasileira sobre a implantação de usinas de energia eólica offshore no Brasil, bem como entender como esta legislação vem sendo construída e como serão desenvolvidos os meios de transmissão de energia elétrica gerada.

Para isso foram mapeadas as principais agências do setor elétrico brasileiro, o seu escopo de trabalho e o seu envolvimento, trazendo uma avaliação regulatória completa dos requisitos de conexão ao SIN.

Foi avaliado também o melhor cenário para acomodar os novos projetos de geração de energia, levando em conta as modalidades de leilões de energia existentes no Brasil.

Em relação a Legislação Brasileira para energia eólica offshore, o objetivo foi identificar a evolução da indústria offshore em relação ao contexto atual do Setor Elétrico Brasileiro, bem como analisar o desenvolvimento desta indústria no mercado internacional. Adicionalmente, mapeou-se a legislação brasileira em conjunto com a regulamentação para Energia Eólica Offshore, incluindo as linhas de transmissão de energia e o licenciamento ambiental.

No âmbito da legislação atual para a implementação de parques eólicos, a entidade que concederá a “licença” para exploração do recurso natural para fins de geração de energia elétrica é a ANEEL, com base na Resolução Normativa 1.071/2023. O passo a passo e o cronograma estão diretamente relacionados à legislação vigente e à forma como o empreendedor submeterá o processo.

Com a intenção de desenvolver cenários para orientar projetos na costa brasileira, foi realizado pesquisas sobre os modelos que foram previamente utilizados internacionalmente a fim de antecipar as possibilidades que poderiam ocorrer no Brasil.

Também foram elaborados cenários referentes a um conjunto de caminhos estrategicamente desenhados para compreender uma questão particularmente crítica. Com base na legislação vigente e no Projeto de Lei 576 para Energia Eólica Offshore, foram identificados caminhos potenciais para a viabilidade de usinas eólicas offshore no Brasil.

2.2 Análise de viabilidade do sistema elétrico

Para compreender o impacto da instalação das usinas offshore no SIN e a viabilidade do escoamento da energia produzida pelos parques eólicos, se fez necessária a avaliação do fluxo de potência com a entradas dos parques. Essa avaliação tem como objetivo verificar se as linhas e equipamentos previstos para o sistema de transmissão nacional no horizonte de entrada em operação dos parques são suficientes para o escoamento da energia gerada sem que seus limites de carregamento nominais sejam superados. Tais critérios baseiam-se nas diretrizes para elaboração de estudos elétricos e procedimentos de rede do ONS [15][16][18].

Ademais, a análise também tem o intuito de determinar, quais subestações próximas à instalação das usinas offshore são mais adequadas para a conexão do parque ao SIN. Como critério de escolha, além da proximidade com a eólica offshore, também é avaliada a subestação em que a conexão causa o menor impacto para as linhas e equipamentos do sistema. Esses critérios se traduzem na alternativa mais econômica para a conexão das usinas.

2.2.1 Processo de seleção dos pontos de conexão - Fluxo de potência

As três regiões de implantação são avaliadas separadamente e, para cada uma delas, são avaliadas a entrada em operação no ano previsto e, devido às incertezas desse momento inicial do projeto, são avaliadas também a possibilidade de entrada em operação em um ano antes e um ano após a previsão de entrada em operação. Em todas essas análises são verificadas as condições de operação do sistema em operação normal, íntegro (N), e em contingência de um elemento da rede, condição (N-1).

Inicialmente, são levantadas todas as subestações, de 230 kV ou nível de tensão superior, que estão fisicamente próximas do parque offshore. Utilizando o software ANAREDE e os casos de fluxo de potência disponibilizados pela EPE (PDE 2033), em cada uma das subestações levantadas é avaliada a injeção de 2 GW, potência esperada como geração das usinas. Essas avaliações consideraram a operação normal do sistema.

Em seguida, nos pontos de conexão em que foi possível a injeção de 2 GW, é avaliada também a operação em N-1 do sistema. Nesse cenário são utilizados como critério para a verificação da adequabilidade do ponto de conexão a ausência de subtensões e sobretensões na rede e a ausência de sobrecarga em linhas e transformadores. Como contingências, são escolhidos, em média, 7 linhas de transmissão ou transformadores cuja perda causa maior impacto no carregamento dos outros elementos próximos ao ponto de conexão avaliado.

As subestações em que, após a injeção da potência esperada dos parques offshore, foi verificada a ausência ou os menores índices de violações de tensão nas subestações e sobrecarga em linhas e transformadores próximos a ela são então selecionadas como pontos de conexão viáveis para as usinas offshore no horizonte previsto.

2.2.2 Processo de seleção dos pontos de conexão - Curto-circuito

Posteriormente, em uma análise complementar, são verificados os aumentos do nível de curto-circuito nessas subestações selecionadas e naquelas em sua vizinhança imediata, com o objetivo de verificar o impacto sobre chaves e disjuntores existentes no sistema com a entrada em operação dos parques.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados conforme assuntos e sequência de tópicos apresentados no item 2 METODOLOGIA.

3.1 Roadmap para acesso ao SIN

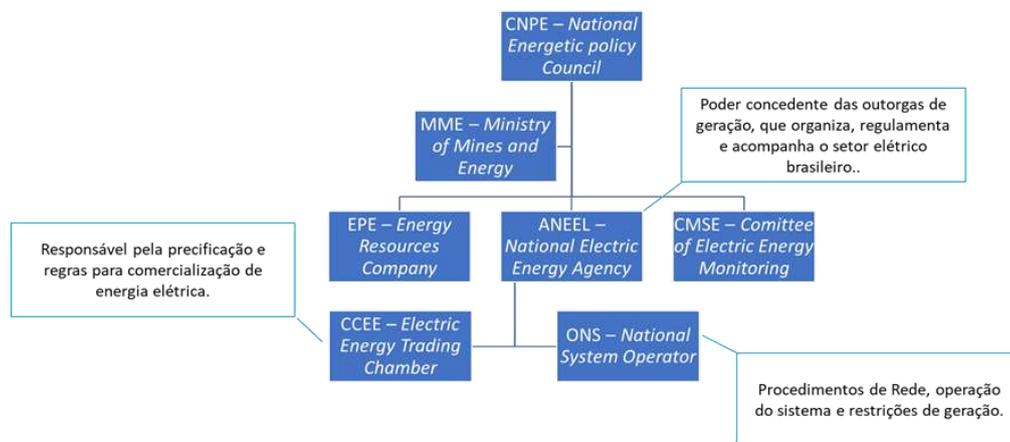
Referente aos assuntos regulatórios foi analisado o estado atual da regulação brasileira sobre a implantação de usinas de energia eólica offshore no Brasil e de como esta legislação vem sendo construída. Além disto, foi realizado alternativas de cenários para viabilidade de projetos offshore no Brasil, considerando a conexão à rede, suas restrições ao fluxo e licenciamentos ambientais.

3.1.1 Principais Órgãos Governamentais

O setor energético brasileiro é composto por uma série de entidades que se relacionam com o CNPE – Conselho Nacional de Política Energética, responsável por avaliar o poder executivo para desenvolver as políticas e diretrizes energéticas. Este Conselho é responsável pelo setor de energia elétrica, gasolina, gás natural, biocombustíveis e pela coordenação do PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia e do PNE – Plano Nacional de Energia (MME, 2024).

Em relação ao setor elétrico no Brasil, na Figura 1 é apresentado um organograma contendo o relacionamento entre os órgãos e a hierarquia de cada participante. Foram destacadas as principais atividades que são desenvolvidas em cada organização relacionadas com Usinas Eólicas Offshore. (MME, 2024).

Figura 1 - Hierarquia das agências do Setor Elétrico Brasileiro.



Fonte: MME, 2024 (Adaptado).

3.1.2 SIN – Sistema Interligado Nacional

Trata-se de um grande sistema hidrotérmico de geração e transmissão de energia, cuja operação envolve modelos complexos de simulação coordenados e monitorados pelo Operador Nacional de Sistemas Elétricos (ONS), que, por sua vez, é fiscalizado e regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). As usinas são responsáveis pelo fornecimento de energia a todas as regiões interligadas eletricamente (CEMIG, 2023). Este sistema está rapidamente se conscientizando das fontes intermitentes, como a energia eólica e solar.

O sistema é composto por geradoras das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste, além de parte da região Norte, com capacidade instalada total de 222,986 GW (ONS, 2024).

Até o final de 2023, a rede de transmissão era composta por 171.640 quilômetros de linhas de transmissão, segundo dados do ONS. Isso permite a integração eletroenergética entre os sistemas de geração e transmissão para abastecer o mercado consumidor (ONS, 2024).

3.1.3 Panorama do Mercado de Energia no Brasil

No mercado energético brasileiro existem dois tipos de consumidores: os que estão no “Mercado Aberto/Livre” e os que estão no mercado regulado. O segundo tipo é geralmente composto por empresas e residências de baixo consumo, e são abastecidos por concessionárias de distribuição. Os consumidores com cargas superiores a 300 kW (a partir de 2024) poderão comprar a sua energia diretamente a um gerador de energia, de forma que os preços da energia podem ser negociados diretamente entre as partes (CCEE, 2024).

No âmbito do mercado regulado, existem seis modalidades de leilões de energia dedicados a diversas fontes ou que atendem a requisitos de carga. O prazo do leilão define o cronograma do projeto, por exemplo, um Leilão A-5 entrará em operação no final dos próximos 5 anos. A figura abaixo demonstra as modalidades de leilões existentes no Brasil (CCEE, 2024).

Figura 2 - Modalidades dos leilões de energia no Brasil.



Fonte: CCEE, 2024.

3.1.4 Marco Legal para Energia Eólica Offshore

O marco legal da energia eólica offshore teve início com o Decreto nº 10.946/2022, definindo as primeiras diretrizes para o uso do espaço marinho voltado para geração de energia eólica offshore. Na sequência, alguns projetos de leis foram propostos, de maneira a tentar concentrar os esforços para o estabelecimento do primeiro marco legal para Offshore Wind em termos de legislação. Dentre as propostas enviadas ao senado, pode-se destacar o PL576/2021, o qual após algumas modificações em sua nomenclatura foi apensado a partir dos demais textos propostos ao senado, buscando desenvolver um documento que pudesse contemplar os temas necessários para a lei (CONGRESSO NACIONAL, 2024).

Atualmente o PL576/2021 segue em tramitação na Câmara dos Deputados, aguardando análise da relatora responsável desde meados de abril de 2024. Estima-se que ainda neste ano será possível finalizar

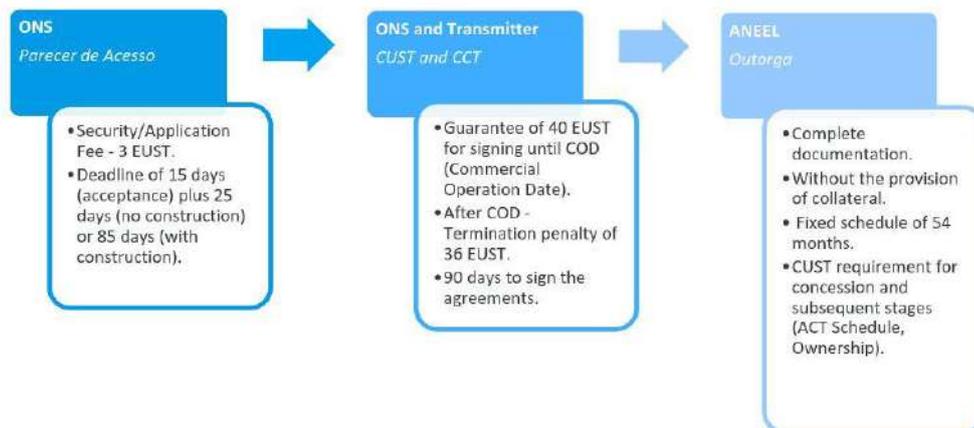
a tramitação, estabelecendo-se assim o marco legal para eólica offshore no Brasil (CONGRESSO NACIONAL, 2024).

3.1.5 Passo a passo para obtenção da Outorga e cronograma com base na Regulamentação

Atualmente, em termos de outorga para geração de energia e conseqüentemente transmissão e venda de energia, temos como base a Resolução Normativa nº1071/2023. Juntamente a esta normativa, uma série de documentos deverá ser respeitada levando e conta as diferentes fases de implementação do empreendimento (ANEEL, 2023).

A implementação do empreendimento solicita que seja obtido um documento para a venda de energia, bem como as licenças ambientais para o local da implementação. Por fim se destaca uma relevante modificação na metodologia atual: A outorga só será concedida aos empreendimentos que antecipadamente solicitaram junto ao ONS o parecer de acesso, e este teve resultado favorável. O diagrama abaixo demonstra com mais clareza estas definições (ANEEL, 2023).

Figura 3 - Etapas da solicitação Outorga e Parecer de Acesso.



Fonte: ANEEL, 2023.

3.1.6 Experiência Internacional

Existem basicamente três modelos para realizar a delimitação de áreas, com aplicações ligeiramente diferentes em cada país:

Modelo “open door”: Não há concorrência para a concessão do direito de uso de áreas para exploração de potencial eólico offshore a entidades privadas. Este modelo é legalmente reconhecido na Dinamarca.

Modelo “Fisrt come, Fisrt served” (FCFS): Neste modelo também não há concorrência para atribuição de áreas para exploração de potencial eólico offshore a entidades privadas. Este modelo foi adotado no Reino Unido e na Holanda.

Licitação/Leilão: A atribuição de áreas para exploração de potencial eólico offshore é concedida a entidades privadas vencedoras do processo de licitação. Este modelo é adotado na Bélgica, Reino Unido,

França, Dinamarca, Holanda, China e Estados Unidos. A Alemanha está atualmente em processo de transição para este sistema (EPE, 2022).

Com base no projeto de lei 576/2021, espera-se que o Brasil conduza um processo competitivo para a primeira onda de usinas elétricas e tenha a possibilidade de desenvolvimento independente (modelo de Portas Abertas) em paralelo, desde que os participantes não estejam solicitando a mesma área (nesse caso, ela será desenvolvida por meio de um processo competitivo/leilão) (IBAMA, 2021).

3.1.7 Possíveis Cenários

A seguir estão descritas as alternativas de cenários para viabilidade de projetos offshore no Brasil.

3.1.7.1 Cenário 1 - Caso a viabilidade do projeto seja alcançada através de leilão de energia

No cenário 1, será considerado a viabilização do empreendimento por meio de um leilão de energia do tipo LEN A-7 – Leilão de Energia Nova no horizonte dos próximos 7 anos. Análise do Cenário 1:

Pontos negativos:

- O preço da energia permanecerá fixo durante toda a operação do projeto.
- A alocação de áreas poderá ser integralmente financiada pelo governo, desconsiderando as áreas de interesse do investidor.
- Como vencedor do leilão, o projeto estará sujeito a prazos, com penalidades pelo descumprimento ou não entrega da garantia física pactuada.
- Re-potenciação no final do prazo do contrato.

Pontos positivos:

- O acesso à transmissão é garantido.
- A venda de toda a energia contratada está assegurada.
- Uma vez que o investidor será compensado pela MUST contratada, não deverá haver problemas com restrições de geração em termos de restrição.
- A Concessão está garantida.
- Como nova fonte de energia, o governo pode potencialmente fornecer subsídios financeiros.

Incertezas:

- As seções oceânicas (Prisma) poderão incorrer em custos associados.
- Não é garantido que haverá subsídios.

3.1.7.2 Cenário 2 - Caso a viabilidade do projeto seja alcançada através de leilão de áreas

O projeto de lei proposto descreve uma das formas possíveis de viabilizar áreas offshore por meio de leilões de áreas. Análise do Cenário 2:

Pontos negativos:

- O investidor estará sujeito a áreas pré-definidas.
- Por não se tratar de um leilão de energia, a energia elétrica poderá ser vendida de outras formas e, neste caso, poderá estar sujeita a restrições de geração.
- Possibilidade de existir múltiplos interessados no mesmo prisma (sobreposição).
- Neste caso, pode não haver incentivo devido a um excesso de oferta de energia.

Pontos positivos:

- Os estudos e licenças ambientais são financiados pelo governo.
- O acesso à área é garantido.
- Entende-se que será garantido o acesso à Concessão e à Transmissão.
- *Re-potenciação* no final do prazo do contrato.

Incertezas

- Ausência de informação sobre a venda de energia.
- A duração da concessão é desconhecida.
- O subsídio não é garantido.

3.1.7.3 Cenário 3: Caso a viabilidade do projeto seja alcançada por iniciativa do próprio investidor

Neste caso será considerado a própria submissão da proposta junto aos órgãos concedentes, seja no caso da obtenção da área offshore, da conexão com o sistema de transmissão e da posterior obtenção da outorga e demais documentos necessários ainda nas etapas anteriores, como certificações de não interferência e licenças ambientais por exemplo. Análise do Cenário 3:

Pontos negativos:

- Possibilidade de mais de um interessado no mesmo prisma ou parte dele.
- O custo dos estudos pode ser alto e a duração do estudo pode ser longa.
- Planejando o descomissionamento do projeto.
- Por exigir que cada etapa seja realizada por conta e risco do investidor, pode estar sujeita a atrasos e não aprovação.

Pontos positivos:

- Possivelmente o custo de utilização das áreas seja menor.
- O próprio empreendedor pode decidir qual prisma utilizar (sujeito a interferências).
- O bônus pela concessão de direitos poderá ser reduzido.

Incertezas:

- Os custos exatos dos estudos ambientais não são conhecidos.
- Não há informações se haverá restrições à conexão.

3.2 Análise de viabilidade do sistema elétrico

Conforme discutido na apresentação da metodologia, o primeiro passo da análise de viabilidade técnica foi avaliar quais eram as subestações fisicamente próximas de cada parque estudado. Na seleção, subestações com tensões inferiores a 230 kV ou subestações coletoras de outros parques não foram levadas em consideração. Dessa forma, inicialmente, a possibilidade de conexão foi avaliada para as seguintes subestações do SIN:

- Parque 1: João Câmara II 230 kV, João Câmara III 500/230 kV e Ceará Mirim II 500/230 kV.
- Parque 2: Campos 2 500 kV, Campos 345 kV e Lagos 2 500 kV.
- Parque 3: Capivari do Sul 525/230 kV, Osório 3 230 kV, Osório 2 230 kV e Atlântida 2 230 kV.

Para cada uma das regiões estudadas, foi avaliado o ano previsto para a entrada em operação do parque com ± 1 ano de margem e, para cada uma delas, foram escolhidos os dois pontos de conexão que apresentaram o menor número de limitações para o escoamento. Essa avaliação inicial levou em consideração a injeção de 2 GW, a serem gerados por cada parque, e a operação íntegra do sistema de transmissão.

A tabela a seguir apresenta o resumo da análise. Na região do Parque 1, foi verificado que a conexão em João Câmara III 500/230 kV é a mais apropriada. Na região do Parque 2 as subestações com o melhor desempenho foram Campos 2 500 kV e Lagos 2 500 kV. Por sua vez, para o Parque 3, foram selecionadas as subestações de Capivari do Sul 500/230 kV.

Tabela 1. Resumo da análise para a escolha das subestações elegíveis como pontos de conexão dos parques

Parque	Anos avaliados	Subestações levantadas	Condição do sistema
1	2032, 2033 e 2034	João Câmara II 230 kV	Sobrecarga inviável na LT 230 kV João Câmara III - João Câmara II C1/C2
		João Câmara III 230 kV	OK
		João Câmara III 500 kV	OK
		Ceará Mirim II 230 kV	Em alguns cenários de carga o sistema se mostrou instável
		Ceará Mirim II 500 kV	Em alguns cenários de carga o sistema se mostrou instável
2	2031, 2032 e 2033	Campos 345 kV	Sobrecargas registradas no sistema mesmo sem contingência (N-1)
		Campos 2 500 kV	OK
		Lagos 2 500 kV	OK - Apresentou pequenas sobrecargas no sistema durante a ocorrência de contingências (N-1)
3	2033, 2034 e 2035	Capivari do Sul 230 kV	Sobrecarga nos transformadores 525/230 kV da SE Capivari do Sul mesmo sem contingências (N-1)
		Capivari do Sul 500 kV	OK
		Osório 2 230 kV	Sobrecarga em vários pontos do sistema mesmo sem contingências (N-1)
		Osório 3 230 kV	Sobrecarga em vários pontos do sistema mesmo sem contingências (N-1)
		Atlântida 2 230 kV	Sobrecarga em vários pontos do sistema mesmo sem contingências (N-1)

Em seguida, para as subestações selecionadas foi conduzida uma análise mais aprofundada do comportamento do sistema considerando a injeção de potência dos parques. Para tanto, foi levantado ano

a ano, desde a previsão de entrada em operação do parque até o último ano disponível na base de dados da EPE no momento (2038), as tensões nas barras próximas ao ponto de conexão e o carregamento das linhas e transformadores da região. Além da observação do sistema íntegro, como feito na primeira análise, contingências simples (N-1) foram aplicadas. O objetivo principal dessa segunda análise foi definir o ponto de conexão que, frente à evolução do sistema e às contingências simples, tem a menor quantidade de limitações.

De forma a realizar uma avaliação mais completa, a análise foi conduzida em três cenários de carga do sistema, leve, média e pesada. Desse modo, foi possível verificar as condições mais críticas tanto sob o ponto de vista de carregamento de linhas e equipamentos quanto de tensões nas barras das subestações. A seguir, os resultados para cada parque são detalhados.

3.2.1 Parque 1

Na simulação da conexão do complexo eólico 1 na subestação de João Câmara III 500 kV não foram registradas restrições de tensão nas barras da região. Também não foram registrados sobrecarregamentos significantes nas linhas e transformadores da região, sendo o mais crítico deles a sobrecarga de 0,54% do transformador 500/138 kV da SE João Câmara III. Uma vez que esse valor foi registrado em situação de emergência do sistema, sem o outro transformador 500/138 kV da mesma subestação, essa sobrecarga não configura uma limitação, pois está dentro do limite de emergência do equipamento (20% por até 4 horas [17]).

Por outro lado, para a conexão na SE João Câmara III 230 kV foram registradas sobrecargas em diversos cenários, variando de 0,55% a 34,35%, nos transformadores 500/230 kV e 500/138 kV da SE João Câmara III. Apesar desses valores estarem abaixo do limite do equipamento de 40% durante até 30 minutos [17], são sobrecargas mais críticas do que aquelas registradas para a conexão no 500 kV. Por esse motivo, a SE João Câmara III 500 kV foi definida como o ponto de conexão mais adequado para o Parque 1.

3.2.2 Parque 2

Na conexão do Parque 2, os dois pontos de conexão ao SIN avaliados, SE Campos 2 500 kV e SE Lagos 500 kV, se mostraram igualmente viáveis. Para as duas opções, mesmo em contingência simples, dentro de todos os cenários e anos avaliados, não foram registradas sobrecargas ou violações de tensão após a conexão do parque.

Nesse caso, a seleção do ponto mais adequado permeou também a viabilidade econômica. Uma vez que as duas subestações são de mesmo nível de tensão, os custos para a ampliação da subestação e a conexão do parque seriam semelhantes. O principal custo envolvido que diferencia as duas alternativas é a extensão da linha que conectará a subestação coletora do parque à subestação do SIN. Nesse caso, a conexão do parque na SE Lagos 2 500 kV se mostrou mais atrativa, pois a ligação em 500 kV teria

aproximadamente 14 km, enquanto para a SE Campos 2 500 kV, essa ligação é de aproximadamente 40 km.

3.2.3 Parque 3

Por sua vez, na simulação da conexão do Parque 3 ao SIN, constatou-se que para a SE Capivari do Sul 230 kV ocorreram sobrecargas nos transformadores 525/230 kV da subestação em valores bem acima de 40%, além de sobrecargas em linhas da região, quando avaliadas contingências simples após a conexão do parque. Por outro lado, a conexão na SE Capivari do Sul 525 kV, para todos os cenários e anos avaliados, não foram registradas superações de carga ou tensão, mesmo em contingência simples do sistema. Portanto, o ponto de maior viabilidade para a conexão do Parque 3 ao SIN é a SE Capivari do Sul 525 kV.

3.2.4 Análise de curto-circuito

Além do aumento do carregamento de linhas e transformadores, a disponibilidade do sistema para a conexão dos parques deve levar em consideração também o aumento do nível de curto-circuito nas subestações. Nesse sentido, foram avaliados o nível de curto nos pontos de conexão de maior viabilidade para cada parque, antes e após a sua conexão.

Foi verificado que para as três subestações escolhidas, João Câmara III 500kV, Lagos 500 kV e Capivari do Sul 525 kV, a entrada em operação dos parques elevou o nível de curto dessas subestações, conforme esperado. Porém, o aumento da corrente de curto-circuito foi pequeno, sendo os valores registrados ainda muito abaixo dos limites dos equipamentos dessas SEs. Com a entrada do Parque 1 houve aumento de 0,34% no nível de curto na SE de conexão, enquanto para o Parque 2 e para o Parque 3 os aumentos registrados foram de 6,36% e 10,59%.

Portanto, concluiu-se que a conexão dos parques ao SIN não oferece risco aos equipamentos já instalados. É importante ressaltar que a avaliação foi feita com base em valores típicos de impedância para o transformador e de contribuição de corrente de curto para instalações onshore no país. Apesar da conexão nas subestações do SIN serem semelhantes para os parques offshore e onshore, com a definição dos equipamentos a serem instalados nesses empreendimentos, os resultados obtidos podem se diferenciar dos apresentados nessa análise. Entretanto, espera-se que a variação não seja expressiva e que os resultados e análises apresentadas sejam utilizadas para embasar o dimensionamento inicial do empreendimento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise de viabilidade para parques eólicos offshore no Brasil aborda diversos cenários e procedimentos para a implementação bem-sucedida desses projetos, considerando a legislação vigente e o Projeto de Lei 576/2021. Acredita-se que a maioria das outorgas será concedida por meio de leilões, devido ao menor risco associado, especialmente em relação ao ponto de conexão e à possibilidade de interferência de outros agentes.

No primeiro cenário, Leilão de Energia, há o envolvimento de leilões focados na venda do montante de energia gerada por esses empreendimentos. O desenvolvedor será responsável pelo financiamento do projeto e pela obtenção de contratos de compra de energia (PPA's) de forma independente. O leilão oferecerá informações padronizadas e um ponto de conexão pré-definido, proporcionando uma vantagem significativa aos desenvolvedores que investirem em estudos de monitoramento e avaliação das condições locais.

No segundo cenário se tem o Leilão de Área, um processo que envolve a combinação do desenvolvimento via Oferta Permanente e o registro dos projetos em leilões de energia. Os projetos vencedores terão contratos de PPA associados à Outorga e acesso garantido à transmissão, minimizando os riscos de restrições de geração.

No terceiro cenário, a viabilidade dos projetos será alcançada por iniciativa própria dos investidores. Isso envolve a submissão de propostas às autoridades competentes para obtenção de áreas offshore, conexão ao sistema de transmissão e aquisição da Outorga, além das certificações necessárias. Esse cenário permite maior flexibilidade e potencial redução de custos, mas também apresenta riscos significativos devido à possibilidade de múltiplos interessados na mesma área e aos altos custos dos estudos preliminares.

Além da análise regulatória, a análise de viabilidade permeia a disponibilidade do sistema de transmissão brasileiro para acomodar as usinas offshore. Nesse sentido, um ponto crucial é a análise de fluxo de potência preliminar, que visa prever quais subestações do sistema tem capacidade de escoar a energia gerada pelos parques eólicos sem que ocorram violações de carregamento em linhas e equipamentos do sistema, ou violações de tensão nas barras. Esse processo é essencial para determinar a viabilidade técnica de conexão ao SIN. Para cada ponto de conexão avaliado — Parque 1 (Nordeste), Parque 2 (Sudeste) e Parque 3 (Sul) — foram estudados anos projetados de operação com um desvio de ± 1 ano. Os resultados indicam que o sistema é menos restritivo para essa demanda para o parque localizado no Sudeste. Por outro lado, as maiores restrições foram encontradas para a conexão do parque localizado no Nordeste, local em que já há grande volume de geração eólica e fotovoltaica onshore. Apesar das limitações encontradas, foi possível a conexão dos três parques de 2 GW nas localidades selecionadas, sem a necessidade de reforço do sistema planejado.

A implementação de parques eólicos offshore no Brasil requer um planejamento cuidadoso e a consideração de múltiplos fatores, incluindo aspectos técnicos, econômicos, ambientais e legais. A escolha do cenário adequado dependerá das características específicas de cada projeto e das condições de mercado. Também será necessário desenvolver a expertise na implantação deste tipo de empreendimento, associado ao grau de maturidade e eficiência dos projetos. A perspectiva de leilões oferece uma estrutura padronizada e segurança para os desenvolvedores, enquanto a iniciativa própria permite maior flexibilidade e potencial de inovação. Independentemente do cenário escolhido, a colaboração entre governo, investidores e stakeholders será crucial para o sucesso dos projetos e a promoção de uma matriz energética sustentável e diversificada no Brasil.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL. REN 1071/2023. Brasília DF, 2023.
- [2] BRASIL. DECRETO Nº 10.946, DE 25 DE JANEIRO DE 2022. Brasília – DF, 2022.
- [3] CONGRESSO NACIONAL. PL 576/2021. Brasília - DF, 2024.
- [4] EPE. Roadmap Eólica Offshore Brasil. Rio de Janeiro – RJ, 2020.
- [5] EPE. EMPREENDIMENTOS EÓLICOS DEZEMBRO DE 2021 – EXPANSÃO DA GERAÇÃO - Instruções para Solicitação de Cadastramento e Habilitação Técnica com vistas à Participação nos Leilões de Energia Elétrica. Brasília – DF, 2021.
- [6] IBAMA. TERMO DE REFERÊNCIA, Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental EIA/RIMA, Tipologia: COMPLEXOS EÓLICOS MARÍTIMOS (OFFSHORE). Brasília – DF, novembro de 2020.
- [7] MME. Conheça as instituições do setor elétrico brasileiro e as competências de cada uma. Brasília – DF, 2024.
- [8] ONS. Procedimentos de Rede. Submódulo 7.1 do Módulo 7. Brasília – DF, 2023.
- [9] ONS2. O SIN: O Sistema em Números. Brasília – DF, 2024.
- [10] RASCKE, Antonio Carlos Leandro; PEREIRA, Deyvid Da Coregio Pereira, O Setor Elétrico Brasileiro e o Código Brasileiro de Energia Elétrica. UNISUL, 2021.
- [11] SENAI. Avaliação de Estratégias Locacionais para Suporte de Infraestrutura de Transmissão para Eólica Offshore. SENAI RN, Governo do Estado do Rio Grande do Norte, 2023.
- [12] SIGA ANEEL. Matriz Elétrica Brasileira. Brasília, 2024.
- [13] CCEE. Leilões: Processo do Leilão. Brasil, 2024.
- [14] SENADO FEDERAL. Projeto de Lei Nº 11.247 de 2018. Brasília - DF, 2024.
- [15] Diretrizes para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão – ONS – Revisão 1 (2022).
- [16] Procedimentos de Rede do ONS – Submódulo 2.3 – Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos – Revisão 08/2021.
- [17] Procedimentos de Rede do ONS – Submódulo 2.6 – Requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos – Revisão 08/2022.
- [18] Procedimentos de Rede do ONS – Submódulo 2.10 – Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão – Revisão 10/2023.

Considerações Geotécnicas para *Shore Approach* de Cabos no Nordeste do Brasil

Peter Simpson¹, Matheus Lucchesi², Guilherme Moreira³, Flavio Salvador⁴, Adriano Gouveia⁵

2H, Neoenergia

pete.simpson@2hoffshore.com, matheus.lucchesi@2hoffshore.com, guilhermegrossi@hotmail.com, flavio.martins@neoenergia.com, agouveia@neoenergia.com

RESUMO

O presente documento descreve o fenômeno geológico conhecido como beachrock, que está presente nas latitudes equatoriais, especialmente ao longo da costa do Nordeste do Brasil, onde muitos projetos eólicos estão sendo planejados. Beachrock é um sedimento duro e consolidado, existente em uma zona posterior ao longo da costa, às vezes exposto e às vezes abaixo de uma camada de sedimento mais macia. Essa camada de beachrock representa um desafio técnico, econômico e ambiental para a passagem de cabos elétricos que terão de atravessar a região costeira sem risco de abrasão. São apresentadas diferentes soluções técnicas de instalação, mas que dependem da geologia específica do percurso planejado. Conseqüentemente, são necessários estudos geológicos detalhados no início de qualquer plano de desenvolvimento para avaliar os custos e impactos ambientais associados.

Palavras-chaves:

Energia eólica; *Offshore*; Cabo de exportação, *shore approach*, Trincheira, Perfuração Horizontal Direcional.

ABSTRACT

This paper describes a geological phenomenon known as beachrock, which is commonly present in equatorial latitudes, and specifically along the Northeast coast of Brasil where many offshore wind developments are being planned. Beachrock is a hard, consolidated sediment, existing in a later along the coast, sometimes exposed and sometimes below a layer of soft sediment. This layer of beachrock presents a technical, economic and environmental challenge to export cables which will need to traverse the nearshore region without risk of abrasion. Different technical installation solutions are presented but depend on the specific geology of the planned route. Consequently, detailed geological surveys are required early in any development plan to assess the associated costs and environmental impacts.

Keywords:

Wind power, Offshore, export cable, shore approach, trenching, Horizontal Directional Drilling.

1. INTRODUÇÃO

O mercado eólico offshore brasileiro ainda é pouco desenvolvido. Porém, com tanto potencial de produção de energia offshore, principalmente no Nordeste do Brasil, o país está se preparando para a implantação desses empreendimentos. No entanto, existem muitos desafios técnicos, legais e logísticos ainda a serem superados, e este artigo descreve os desafios relacionados às abordagens costeiras para cabos elétricos, particularmente na região nordeste, onde a presença de beachrock “tipo franja”, uma rocha sedimentar cimentada que consiste em uma mistura variável de cascalho, areia e sedimentos do tamanho de lodo é predominante.

Este artigo descreve as formações de beachrock presentes ao longo da costa do Nordeste do Brasil, onde muitos projetos eólicos offshore estão sendo planejados, e discute os riscos, tecnologias e mitigações que devem ser consideradas no shore approach para qualquer empreendimento planejado na região.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A porção do litoral da região Nordeste do Brasil onde se concentram as poligonais dos projetos eólicos offshore protocolados no Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA), possui espaço marítimo com profundidades relativamente rasas e numa faixa estreita, quando comparadas com as demais áreas do espaço marinho brasileiro em que o potencial eólico offshore se mostra promissor.

Nestas áreas, dentre outras particularidades, foi identificado que alguns dos projetos eólicos offshore podem ter, em maior ou menor grau, premissas e restrições de projeto associadas à existência de beachrocks (ou arenitos de praia) próximos à superfície do leito marinho e, em alguns casos, afloramentos que podem ultrapassar a cota do nível do mar.

O presente documento pretende abordar os impactos no estudo de traçado de cabos subaquáticos para transmissão da energia gerada por projetos eólicos offshore, que avançam em direção ao continente, em regiões em que os beachrocks sejam um desafio a ser superado, considerando as premissas técnicas, assim como as premissas ambientais.

Nos seios destas formações são identificadas diversas conchas e fragmentos de algas, cuja relevância ambiental deve ser estudada para uma eventual necessidade de intervenção de passagem dos cabos elétricos de conexão dos projetos eólicos offshore ao continente. Corais vivos são encontrados nesta área com bastante frequência e, também, novas formações de beachrocks modernos. Tratando-se de componentes orgânicos, as algas são os mais abundantes, seguidas por conchas de moluscos, principalmente lamelibrânquios, com certa recristalização e, ainda, algumas conchas de ostracodes. Esta estrutura é possivelmente formada em um meio pouco agitado, de profundidade rasa, numa zona submarina bem oxigenada com precipitação química e bioquímica dos carbonatos.

Além disso, alguns autores citam os beachrocks como elementos naturais de proteção da zona costeira, impedindo a exposição direta a ondas, reduzindo, assim, os processos erosivos de praias.

As primeiras referências na literatura sobre beachrocks no Brasil, são encontradas nos trabalhos de Darwin (1841) e, posteriormente, Branner (1904). Vários outros estudos podem também ser citados, de diversas partes do mundo. Entretanto, há quem defenda que a ocorrência das beachrocks seja restrita a zonas tropicais e subtropicais, entre as latitudes de 35 graus norte e 35 graus sul, assim como Russel (1962), que entendeu que o aparecimento destes corpos se dava no cinturão quente. Entretanto, outros autores como Kneale & Viles (2000), Omoto (2004), Rey et al. (2004), Vousedoukas et al. (2007), indicam que estes corpos de arenitos de praia ocorrem também em zonas temperadas e frias, ainda que com cimentação incipiente. São apontadas evidências na Escócia, Itália, Grécia, Portugal, Espanha e no Japão.

Tratando-se do litoral nordestino brasileiro, o estudo dos arenitos de praia foram objeto de diversos trabalhos, com destaque para Andrade (1955), Mabeoone (1964), Van Andel & Laborel (1964), Ferreira (1969), Bigarella (1975), Coutinho & Fairas (1979), Guerra (2000), Amaral (2000), Caldas et al. (2006), Bezerra et al. (1998, 2005), Ferreira Jr. (2005), Guerra et al. (2005), Vieira et al. (2007), entre outros. É uma vasta fonte de conhecimento que merece ser revisitada na oportunidade de análise dos estudos de

engenheiros dedicados à implantação de projetos eólicos offshore, desde a fundação dos aerogeradores, da subestação offshore e, como o objeto deste texto, ao lançamento de cabos elétricos.

As formações de beachrocks podem se estender em cordões paralelos à praia, constituindo verdadeiras barreiras ou em recifes “tipo franja”, com superfície irregular, enrugada e erodida. No litoral de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará, a costa é baixa, bordejada em direção ao interior por formações tabulares argilosas, denominadas Formações Barreiras. São de erosão fácil, entalhadas nas planícies de erosão sedimentares. Em 1904 o autor Branner já havia publicado um dos primeiros estudos sobre estas formações no Nordeste do Brasil em que registrou que “...não existe fenômeno mais notável na costa nordestina do que os recifes rochosos...”.

O afloramento destes arenitos de praia merece atenção especial quanto ao estudo do traçado dos cabos elétricos de exportação da energia gerada nos parques eólicos offshore até a subestação onshore, onde não for possível evitar sua transposição ou perfuração, sobretudo em situações em que os arenitos ultrapassam a cota de superfície da água.

Ainda que existam tantos trabalhos sobre o assunto, não se chegou a um consenso sobre o processo de cimentação, se ele está associado exclusivamente à água do mar ou se há alguma influência da água doce subterrânea; se tem origem na mistura entre as águas doce e salgada ou ainda se a origem é de natureza biogênica. Muitos autores defendem a tese de que os beachrocks tem formação a partir da precipitação carbonática, com diferentes tipos de cimentação de calcita e aragonita, que são litificados na zona litorânea em profundidades entre 1 e 2m. Estas formações podem encontrar-se dispostas paralelamente à linha de costa na forma de faixas longas e estreitas, separadas entre si por depressões onde se depositam areia ou lama.

Independentemente da certeza sobre a origem da formação destes arenitos, é sabido que seu tempo de formação é muito rápido. Uma experiência comprovada por Friedman (1998) nas Bahamas, registrou a cimentação ao redor de uma lata de sardinha que, após um ano disposta em um ambiente praiado, havia acumulado cerca de 383g de material carbonático oolítico cimentante. A formação de um novo banco de beachrock pode ocorrer em apenas centenas de anos, como mostrou Russel (1959). A formação de arenitos de praia recentes, na cidade de Recife, também foi abordada por Mabesoone (1964). A ocorrência de arenitos de praia modernos plenamente cimentados por cimento carbonático é bastante observada e, ainda que exista mais de um processo de formação, um aspecto comum entre as diversas teorias é o local de sua formação, que ocorre dentro da zona de estrâncio. Portanto, é possível definir e diferenciar outros depósitos devido a esta característica particular.

A figura 2.1 abaixo, retirada de Gomes (2014), ilustra a presença de beachrock do “tipo franja”, apresentando uma “parede” de rocha abrasiva ao longo de trechos significativos do litoral do Nordeste, dentro ou abaixo da zona de ondas. Note, conforme o corte transversal abaixo da imagem, que é mostrado o perfil de beachrock como uma camada profunda de rocha da qual apenas pequenas seções ficam expostas quando não estão cobertas por sedimentos que preenchem as encostas.

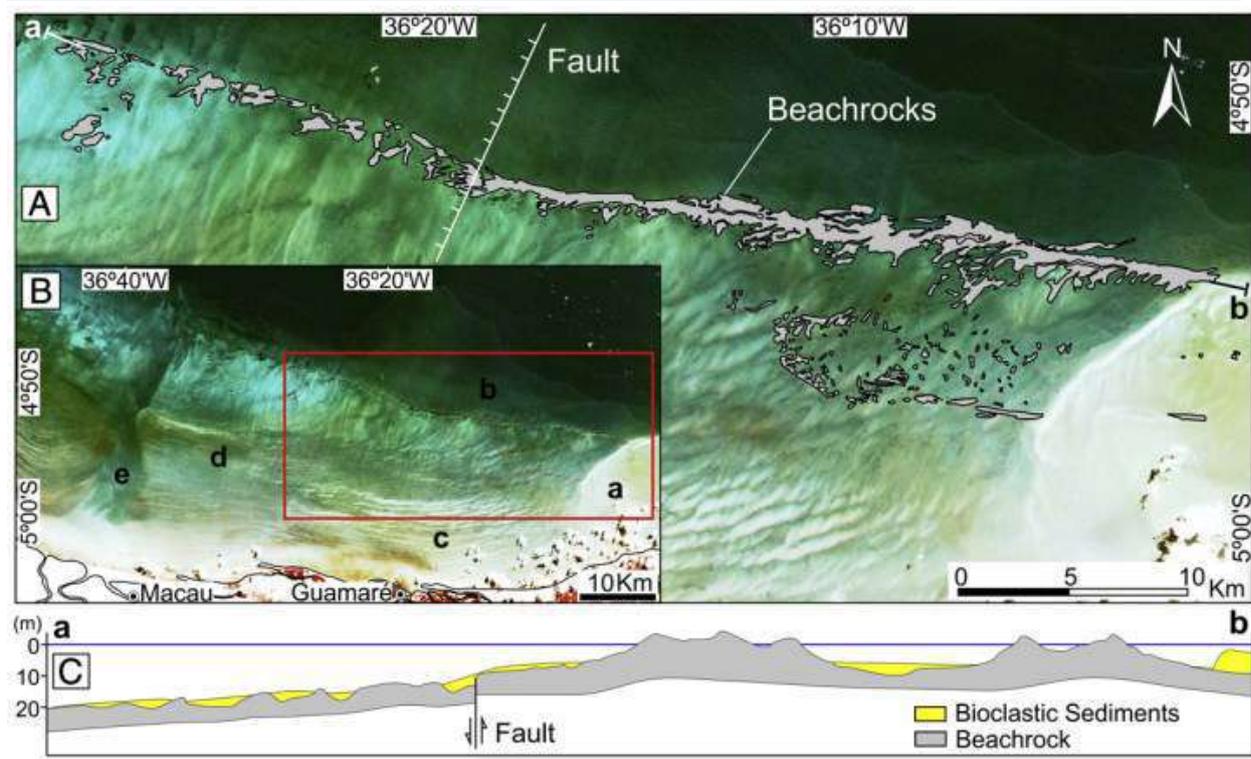


Figura 2.1: Presença de formações beachrock offshore, Gomes (2014)

Implicações para Cabos Elétricos

Um número significativo de complexos eólicos offshore está sendo proposto ao longo da costa Nordeste, conforme ilustrado na Figura 2.2 abaixo. Todos estão localizados em águas rasas, com profundidade de até 50m, e necessitam de um cabo elétrico para conectar a subestação à rede terrestre.

O cabo elétrico é um ponto único de falha para todo o campo e, como tal, é essencial atenção ao método de instalação e proteção deste para que, nem fatores artificiais nem naturais, possam resultar em danos à estrutura.

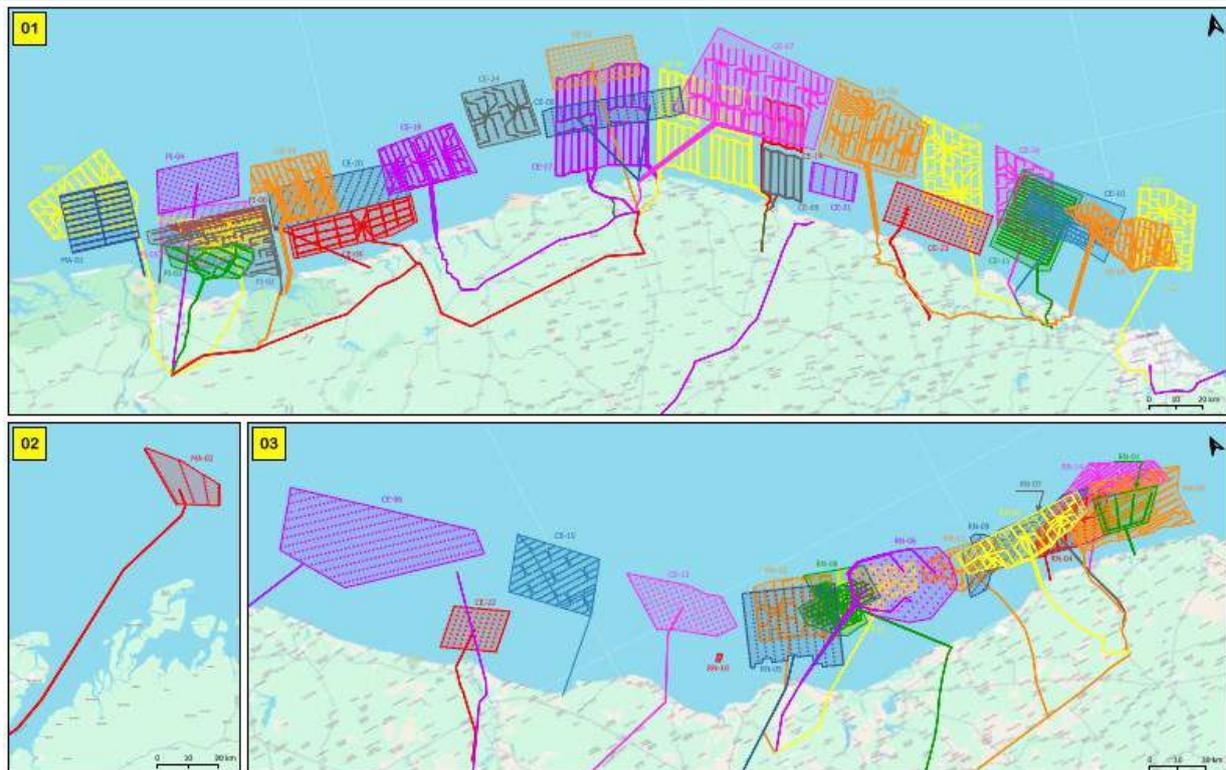


Figura 2.2: Complexos eólicos offshore sendo cogitados ao longo da costa do Nordeste e possíveis *shore approaches* associados, IBAMA (2024)

Em regiões de águas profundas com fundo marinho macio, o cabo possivelmente pode ficar apoiado no fundo do mar, porém, para o Nordeste do Brasil, esta não é uma opção. Como discutido acima, a presença de formações de beachrocks em regiões rasas afetadas pelas ondas resultará na abrasão da capa externa de qualquer cabo que atravesse a beachrock, resultando na falha do cabo e, conseqüentemente, de todo o campo. A proteção externa do cabo usando revestimentos de proteção é possível, mas o cabo ainda estará sujeito ao risco de submersão diferencial em beachrock/limites de sedimento, causando flexão excessiva dele. Além disso, o cabo exposto no fundo do mar corre o risco de incrustação de rochas da praia, resultando em cargas imprevisíveis no cabo, falta de visibilidade para inspeção e risco de danos na capa externa.

Além dos riscos geotécnicos, a região é um local de pesca comum e existe um risco significativo de danos ao cabo devido a âncoras de navios ou redes de arrasto.

Dados os riscos acima mencionados para os cabos elétricos, para proteger o cabo e a integridade do campo, eles devem ser posicionados bem abaixo do fundo do mar. Existem vários métodos de instalação de cabos submarinos abaixo do fundo do mar, mas cada um tem os seus próprios riscos, custos e impactos ambientais, conforme discutido na seção seguinte.

3. TÉCNICAS DE ASSOREAMENTO

Existem 2 métodos principais de instalação de cabos abaixo da linha de lama: perfurar horizontalmente a partir da costa e puxar o cabo através do buraco ou escavar uma vala que é subsequentemente preenchida sobre o cabo.

Perfuração Horizontal Direcional

A Perfuração Horizontal Direcional, ou *Horizontal Directional Drilling* (HDD), é mais adequada para rochas duras ou sedimentos consolidados (como aqueles encontrados no nordeste do Brasil), onde o cabo deve

seguir um arco raso prescrito. Este método tem um impacto ambiental mínimo no fundo do mar, uma vez que a perturbação ocorre quase inteiramente abaixo do fundo do mar.

O processo de HDD começa com uma plataforma de perfuração localizada em terra, no ponto em que o cabo será conectado à terminação em terra. Primeiro, um pequeno furo piloto é perfurado desde o local em terra até um ponto planejado de “*punch-out*” no mar. A broca piloto é então recolhida e o furo expandido até o tamanho total para acomodar o cabo. Depois que a broca maior for “perfurada”, um cabo é conectado à broca usando uma linha mensageira, e puxado de volta com a broca até o local de terminação.

O HDD é adequado para uma variedade de condições de solo, incluindo argila, silte, areia e rocha, no entanto, não é adequado para áreas com presença de rochedo, cascalho grosso ou pedregulho, pois podem resultar no colapso do furo depois de perfurado.

Em condições nas quais a rocha é altamente abrasiva, como o beachrock, podem ocorrer danos à capa externa do cabo durante as operações de tração. Isto pode ser mitigado instalando um revestimento no furo.

O impacto ambiental deste método está em grande parte confinado às operações onshore e à região offshore.

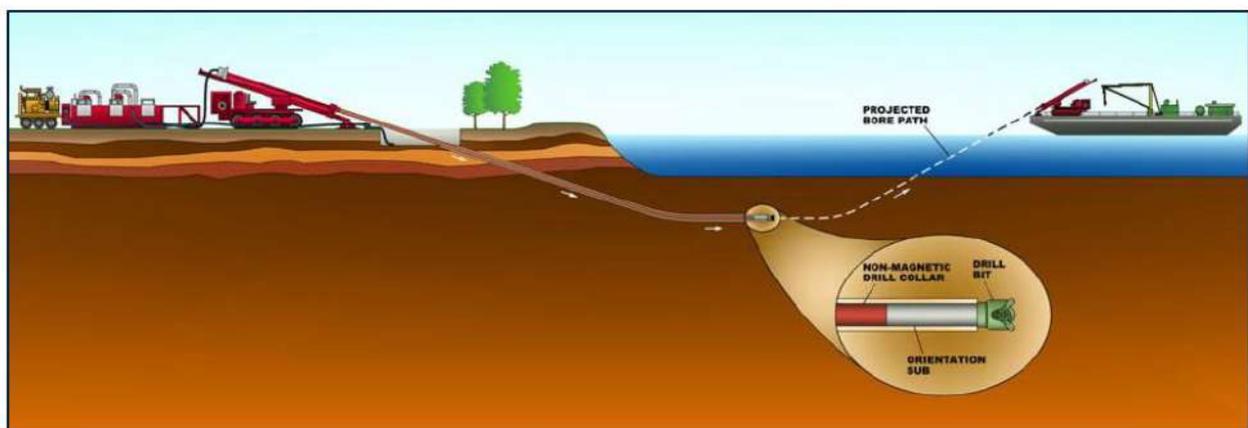


Figura 3.1: Perfuração Horizontal Direcional

Trincheira

Além da perfuração, outra forma de colocar um cabo elétrico abaixo do fundo do mar é através do corte de uma vala no leito marinho, colocando o cabo na vala e depois preenchendo, conforme pode visto na Figura 3.2.

A abertura de valas pode ser realizada por máquinas de corte que raspam fisicamente o fundo do mar, utilizando cortadores mecânicos para rochas e sedimentos consolidados, ou arados ou jatos de água para silte soltos e areias.

Todos os métodos de escavação têm impacto ambiental na flora e fauna do fundo do mar durante a fase de escavação, provocando, dentre outras coisas, perturbações no leito marinho, plumas de sedimentos que causam turbidez na água e poluição sonora marinha, afetando assim os ecossistemas naquele local.



Figura 3.2: Trincheira com cabo

Trincheira através de areia e argila macia

Para seções próximas da costa, ou regiões sem beachrock, uma trincheira pode ser facilmente formada usando um arado submarino (*subsea plough*) que cortará uma trincheira com uma inclinação de 35 graus para evitar o aterro. Os arados submarinos são adequados para uma ampla variedade de solos macios (mas não para beachrocks). Arrastar o arado requer um navio do tipo *Anchor Handling Tug (AHT)* com força de tração adequada do cabeçote e uma mobilização separada para preencher a vala usando um arado de aterro dedicado.

Normalmente, um arado submarino pode escavar até aproximadamente 1,8m em uma única passagem e até 2,5m em uma segunda passagem.

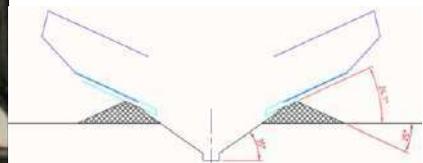
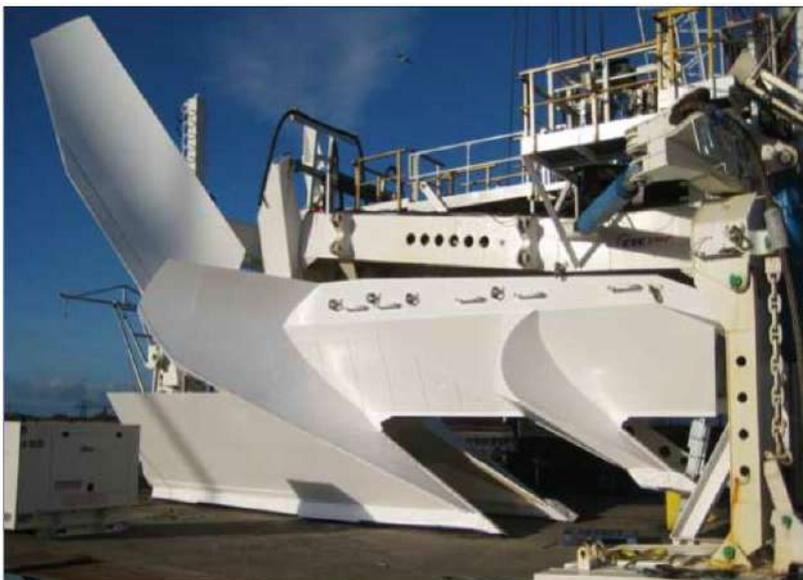


Figura 3.3: Seabed Plough.

Uma segunda opção para solos moles é o jateamento. O cabo é primeiro colocado no fundo do mar e bocais verticais passam de cada lado do cabo, soprando água em alta pressão no leito marinho. Isto liquidifica o fundo do mar e o cabo afunda no solo não consolidado.

Este método de escavação é inadequado para áreas com qualquer *beachrock* ao longo da implantação, pois o cabo precisa ser pré-instalado no fundo do mar. Além disso, o fundo marinho acima do cabo terá de ser reconsolidado antes de fornecer proteção completa e pode ser arrastado pela ação das ondas em áreas rasas antes da reconsolidação.

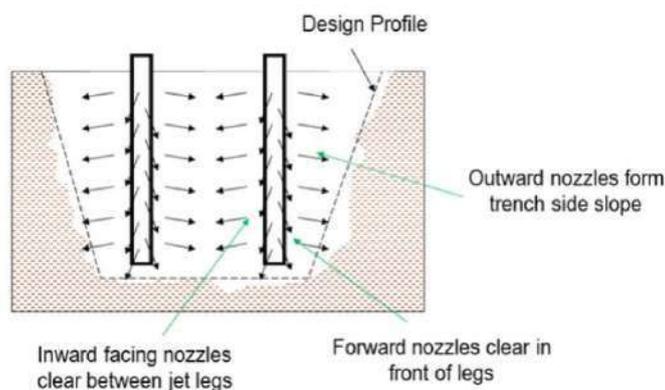


Figura 3.4: Jateamento de Trincheira.

Trincheira através de beachrock

Rotas de cabos elétricos que passam sobre beachrock, ou que podem conter beachrock abaixo da superfície, exigirão escavação mecânica da rocha usando ferramentas de corte, como as mostradas na Figura 3.5.

Esses cortadores podem escavar até 1,2 m para serras cortadoras de rochas, consulte a Figura 3.5, ou 2,0 a 3,0m para cortadores de corrente. Ambos os tipos de cortadores usam dentes mecânicos para cortar a rocha.

A vala resultante terá lados irregulares e será necessário um posicionamento cuidadoso do cabo dentro da vala para evitar danos à capa externa.

Será necessário preencher a vala resultante sobre o cabo com cascalho ou similar.



Figura 3.5: Valetadeira com serra cortadora de rocha.



Figura 3.6 Valetadeira/ máquina de instalar cabos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme discutido nas seções anteriores, a geologia da costa do Nordeste do Brasil mostra uma predominância de sedimentos consolidados na forma de formações de beachrocks duras e altamente abrasivas que podem estar expostas ou abaixo de uma camada fina (ou profunda) de sedimentos macios.

Os idealizadores dos complexos eólicos offshore no Nordeste precisam considerar cuidadosamente o *shore approach* dos cabos elétricos de volta à costa, que provavelmente passarão por uma região de beachrocks. Devido à sua estrutura altamente abrasiva, o cabo não deve entrar em contato com a beachrock por receio de danos por abrasão na capa externa – danos que resultarão num único ponto de falha de todo o empreendimento offshore.

Existem tecnologias para passar o cabo através da beachrock com a Perfuração Direcional Horizontal ou escavação/corte através da beachrock com escavadeiras mecânicas, ou arar através do sedimento. Embora potencialmente viáveis do ponto de vista técnico, ambas as opções têm consequências econômicas e ambientais diferentes, que estão fora do âmbito deste documento, mas devem ser consideradas numa fase inicial de planejamento e avaliações de viabilidade do projeto.

Dada a falta de informação geológica publicamente disponível, para a decisão de perfurar ou abrir trincheiras se necessitará de informação geológica detalhada para definir a adequação de qualquer método. Normalmente, isso incluiria (mas não se limitando a) as seguintes atividades antes que uma avaliação técnica na shore approach possa ser feita:

- Batimetria Detalhada
- Sonar de varredura lateral
- Sísmica de alta resolução
- Mapeamento de magnetômetro

REFERÊNCIAS

Amaral, R. F. "Contribuição ao estudo da evolução morfodinâmica do litoral oriental sul do Rio Grande do Norte, entre Ponta de Búzios e Baía Formosa." *Porto Alegre* (2000).

ANDRADE, GO. "Contribuição para o estudo morfológico da costa pernambucana." *Recife. Tese de concurso, Universidade Federal do Recife* (1955).

Bezerra, Francisco HR, et al. "Holocene coastal tectonics in NE Brazil." *Geological Society, London, Special Publications* 146.1 (1999): 279-293.

Bezerra, F. H. R., et al. "Beachrock fracturing in Brazil." *Journal of Coastal Research* (2005): 319-332.

BIGARELLA, João José. "Reef sandstones from northeastern Brazil (A survey on sedimentary structures)." *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 47 (1975): 395-409.

Branner, John Casper. *The Stone Reefs of Brazil: Their Geological and Geographical Relations, with a Chapter on the Coral Reefs*. Vol. 7. Museum, 1904.

Caldas, Luciano Henrique, Karl Stattegger, and Helenice Vital. "Holocene sea-level history: Evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil." *Marine Geology* 228.1-4 (2006): 39-53.

Coutinho, P. N., and C. C. Farias. "Contribuição à origem dos recifes do Nordeste." *Simpósio de Geologia do Nordeste* 9 (1979): 236-240.

Darwin, Charles. "XXXVII. On a remarkable bar of sandstone off Pernambuco, on the coast of Brazil." *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 19.124 (1841): 257-260.

FERREIRA, Y.A. Recifes de arenito de Salvador, Bahia. *Academia Brasileira de Ciências*, v. 41, p. 542-548, 1969.

Ferreira Júnior, Antonio Vicente. *Mapeamento da zona costeira protegida por arenitos de praia (Beachrocks) em Nísia Floresta-RN*. MS thesis. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.

Friedman, Gerald M. "Rapidly of marine carbonate cementation—implications for carbonate diagenesis and sequence stratigraphy: perspective." *Sedimentary Geology* 119.1-2 (1998): 1-4.

GUERRA, N.C. Mecanismo de sedimentação em sedimentos marinhos recentes, exemplos beachrocks do litoral pernambucano. Rio Claro, 2000. 194 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

Guerra, Núbia C., Chang H. Kiang, and Alcides N. Sial. "Carbonate cements in contemporaneous beachrocks, Jaguaribe beach, Itamaracá island, northeastern Brazil: petrographic, geochemical and isotopic aspects." *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 77 (2005): 343-352.

Gomes, Moab P., et al. "The interplay between structural inheritance and morphology in the Equatorial Continental Shelf of Brazil." *Marine Geology* 355 (2014): 150-161.

IBAMA. "Complexos Eólicos Offshore: Projetos com processos de licenciamento ambiental abertos no IBAMA". Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20240507_Usinas_Eolicas_Offshore.pdf>. Acesso em: 25 Maio 2024.

Kneale, D., and H. A. Viles. "Beach cement: incipient CaCO₃-cemented beachrock development in the upper intertidal zone, North Uist, Scotland." *Sedimentary Geology* 132.3-4 (2000): 165-170.

Mabesoone, JANNES M. "Origin and age of the sandstone reefs of Pernambuco (Northeastern Brazil)." *Journal of Sedimentary Research* 34.4 (1964): 715-726.

MORAIS, Jáder Onofre de. "Contribuição ao estudo dos "Beachrocks" do nordeste do Brasil." *Laboratório de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará. Trabalhos Oceanográficos-Universidade Federal de Pernambuco* 9 (1967): 79-94.

Omoto, Kunio. "Radiocarbon ages and isotope fractionations of beachrock samples collected from the Nansei Islands, southwestern Japan." *Radiocarbon* 46.2 (2004): 539-550.

Otavio, J. M. et al. "Formação e Diagênese de Arenitos de Praia: Uma Revisão Conceitual". *Clio Arqueológica* 2017, V32N3, p.88-106.

Rey, D., et al. "Formation, exposure, and evolution of a high-latitude beachrock in the intertidal zone of the Corrubedo complex (Ria de Arousa, Galicia, NW Spain)." *Sedimentary Geology* 169.1-2 (2004): 93-105.

Russell, Richard J. *Caribbean beach rock observations*. No. 59. Louisiana State University, Coastal Studies Institute, 1959.

Russell, Richard Joel. *Origin of beach rock*. Coastal Studies Institute, Louisiana State University, 1962.

Van Andel, Tjeerd H., and Jacques Laborel. "Recent high relative sea level stand near Recife, Brazil." *Science* 145.3632 (1964): 580-581.

Vieira, Marcela Marques, Luiz Fernando De Ros, and Francisco Hilário Rego Bezerra. "Lithofaciology and palaeoenvironmental analysis of Holocene beachrocks in northeastern Brazil." *Journal of coastal Research* 23.6 (2007): 1535-1548.

Vousdoukas, M. I., A. F. Velegrakis, and Theocharis A. Plomaritis. "Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts." *Earth-Science Reviews* 85.1-2 (2007): 23-46.

A regional atlas of metocean conditions over the Brazilian coast

Renan Braga Ribeiro¹, Gabriel Vieira de Carvalho¹, Pedro Santos²,
Palle Martin Jensen², Sara Jackson²

¹ DHI Water & Environment Inc, Lakewood, CO, USA;

² DHI A/S, Hørsholm, Denmark

rbro@dhigroup.com, gvdc@dhigroup.com, psan@dhigroup.com, pje@dhigroup.com, sja@dhigroup.com

ABSTRACT

Accurate metocean design conditions are the essential input for offshore energy projects from feasibility all the way to detailed design. This paper introduces a new regional atlas composed of spectral wave and 2D hydrodynamical models covering the Brazilian and Uruguayan coasts with unprecedented coverage and spatial resolution. The motivation to deliver an accurate and validated metocean atlas in the region comes from the increasing prospects of seabed usage for offshore wind energy generation. The spectral wave and 2D hydrodynamic models were setup using MIKE Powered by DHI with the domain divided in two regions, called north and south, to cover the Exclusive Economic Zone where offshore wind projects are planned and to account for the distinct atmospheric and ocean flow patterns observed in each distinct area. The validation of both models was done in-situ measurement data from 16 stations for integral wave parameters, 12 for water levels and 2 for currents. Moreover, satellite altimetry measurements were also used to quantify the precision and accuracy of significant wave height results across the entire domain. The validation results point to a high-quality atlas for both integral wave and ocean parameters, with a mean bias (and mean root-mean square error) across all measurement stations for significant wave height of -0.02m (0.29m), peak wave period of -0.24s (1.79s), water level of 0.02m (0.13m) and depth-averaged current speed of 0.01 m/s (0.14m/s). The regional atlas is now hosted online and commercially available inside DHI's Metocean-On-Demand portal. The validation work presented herein shows the suitability of the atlas' underlying data to be used as an input for multiple applications including front-end engineering design of planned offshore wind farms.

Keywords: Offshore wind; Metocean; Design conditions; spectral wave; hydrodynamics.

1. INTRODUCTION

The Brazilian Institute of Environment and Renewable Natural Resources (IBAMA) has received requests for environmental permits for more than 200GW worth of planned installed capacity by offshore wind energy projects¹. Even with superposition of neighboring projects, the ambitious plans outlined by offshore wind developers show the need for accurate and precise design conditions to lower the project risk and provide future leased areas with a metocean database suitable for input into certifiable front-end engineering design (FEED) [1].

With a favorable bathymetric profile along the continental shelf, low incidence of tropical storms combined with a wind climate dominated by trade winds (which yield potentially high annual capacity factors), the Brazilian Exclusive Economic Zone (EEZ) is highly attractive for bottom-fixed offshore wind turbines, considered a mature and developed technology globally. The federal policy, currently being discussed by

¹ [Mapas de projetos em licenciamento - Complexos Eólicos Offshore — Ibama \(www.gov.br\)](http://www.gov.br)

the government, regarding spatial planning and seabed lease is the main hindrance for the kick-off of this technology in Brazil. With the intention to clarify these aspects, the Company of Energy Research (EPE in Portuguese) has published two technical reports outlining international procedures both for spatial planning [2] and lease royalties [3] in several countries where offshore wind is mature.

From early-phase feasibility studies to detailed design, meteorological and oceanographic (metocean) conditions must be characterized using long-term modelled datasets which are validated using local in-situ measurements [1]. The primary objective of this study was to develop and validate high-resolution hydrodynamic and spectral wave models that deliver comprehensive metocean data for Brazil's coastal regions. The output of these models aims to provide a regional metocean atlas suitable to support planning, design, and operation of planned offshore energy projects, providing critical information on waves, currents, and other oceanographic parameters.

Currently for the Brazilian coast, wave and ocean datasets are available from global reanalysis models ran and maintained by independent intergovernmental organizations. An example is The European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) who provides both wave (WAM) and ocean (ORAS5) reanalysis models. However, such models have a low spatial resolution and tend to lack accuracy for a detailed characterization of local sea-state conditions, especially in coastal areas and shallow waters where offshore wind projects are being planned. Figure 1 presents an example of the model mesh around the first proposed offshore wind farm (OWF) in Brazil, Asa Branca I. ECMWF's WAM model (left panel) has only one grid cell around the OWF, while DHI's global wave model (middle panel) has a flexible mesh that follows the coast and covers the OWF with three grid cells.

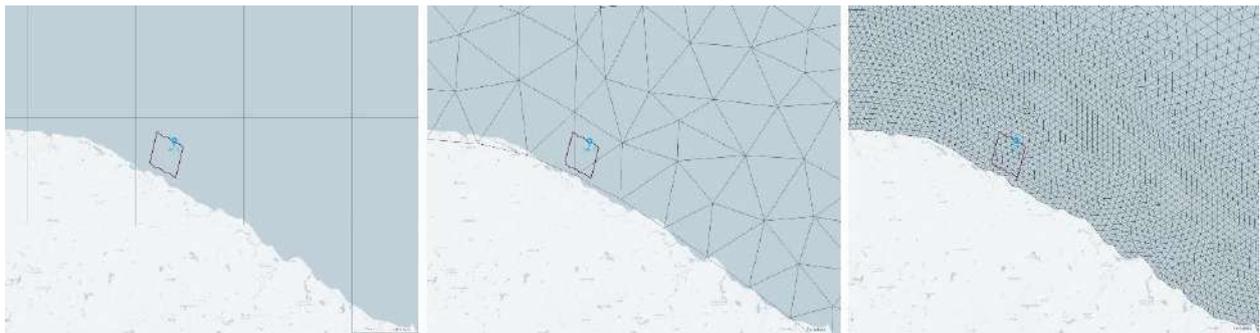


Figure 1: Illustration of Asa Branca I planned wind farm area (purple polygon) with model mesh of ECMWF's global wave model (left), DHI's global wave model (middle) and DHI's Brazil regional model (right).

Although other commercial hindcast wave and ocean models exist in the market, none has gone to the spatial resolution presented herein (Figure 1, right panel). With a spatial resolution in the order of 3km around the planned Brazilian OWFs, this regional atlas has the ambition to provide high-quality metocean data sufficient to be applied in certifiable FEED studies, with the potential to reduce load assessments and ultimately reduce the levelized cost of energy (LCOE) for a given business case (see Figure 3).

This paper is structured as follows: Section 2 provides the theoretical background, discussing the specific physical ocean flow processes pertinent to each domain region that should be captured by a regional model. Additionally, this section addresses the current limitations in global wave model databases, highlighting the need for more refined regional models. Section 3 outlines the methodology used to setup the models, including the selection of the domains, boundary conditions and the validation data from publicly available sources. Section 4 presents the two main results of this work, namely the validation results, with several statistics to quantify accuracy and precision of the main output parameters, and an overview of the resulting statistics of significant wave height across the entire domain, which demonstrates a concrete application of the atlas for planning purposes. Finally, discusses potential further applications and developments of the regional atlas, and conclude the study.

2. THEORETICAL BACKGROUND

Acknowledging the main dynamical oceanographic and meteorological processes that drives and impacts the waves and currents in the studied area is vital to set up the modeling effort. Without extending too much – as this is not the intention of this paper – we briefly discuss the dynamic process that are the most relevant when setting up a wave and currents modelling effort for the Brazilian offshore wind projects areas.

Several large-scale atmospheric systems influence both wave and hydrodynamics. In north Brazilian coastal areas, the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) plays a crucial role, with its seasonal shifts impacting the northern Brazilian coast by altering wind directions and intensities. In the period from June to November, the ITCZ reaches its northernmost position exposing the coastal zone to the southeast trade wind system intensification, while in the period of December to April the ITCZ reaches its southernmost position, exposing the shoreline to the northeast trade winds and waves influence. Additionally, long-fetch waves generated by cyclones in the north Atlantic propagate to the north Brazilian coast mainly from December to April [4]. Along the south and southeastern Brazilian coast, the waves and currents on continental shelf are mostly influenced by semi-stationary atmospheric systems such as the South Atlantic Subtropical High Pressure System (ASAS), which generates persistent southwestward winds generating consistent wave conditions and the passage of transient frontal systems which disrupts the stable conditions established by the ASAS, leading to abrupt changes in wind patterns and wave conditions [5].

Moreover, understanding the influence of large-scale ocean currents on wave propagation is essential, especially in the northern region where the North Brazilian Current (NBC) presents high intensity ($>1\text{ms}^{-1}$) thus potentially exerting a strong influence in the wave propagation. The NBC's strength and direction significantly impact wave patterns, creating complex interactions that can alter wave height and direction. A global assessment of the impact of ocean currents on modeled wave fields by several authors showed that a systematic positive bias of the modeled wave height against altimetry data can be seen, and that including ocean currents in the wave model considerably reduces the reported positive bias [6]. Although presenting a global scale assessment, the authors pointed that this effect can be observed in strong west boundary currents such as the North Brazilian Current (NBC).

When comparing H_{m0} , altimetry derived against the ECMWF ERA5 wave reanalysis [7], a notable positive bias is observed along the northern Brazilian coast, potentially linked to the high intensity NBC. Additionally, a negative bias in the Para-Maranhão basin is evident, likely due to poor bed roughness parameterization and tidal currents representation in this global scale model (Figure 2).

It can also be noted that the bias along the east/southeast/south Brazilian ocean is less prominent and organized, which can be related to the less intense and persistent characteristics of the west boundary ocean current along these regions, known as the Brazil Current (BC). This current can also result in strong currents ($\sim 1\text{ms}^{-1}$) associated with transient mesoscale eddies.

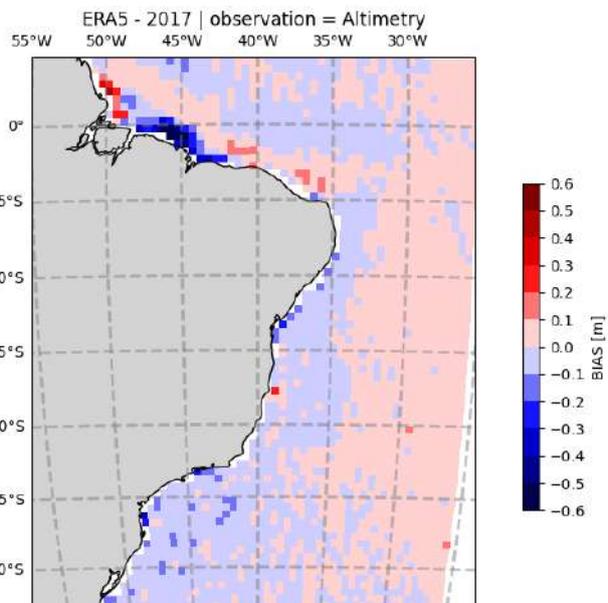


Figure 2: Comparison (BIAS) of H_{m0} derived altimetry data and ECMWF-ERA5 reanalysis results.

Regarding Continental Shelf Circulation, where targeted OWF projects are located, besides western boundary currents (BC and NBC) acting near the shelf break, there are basically three other forcing mechanisms for currents in this long shelf: (1) wind stress, (2) tides, and (3) near coast baroclinic pressure gradients. The importance of each one varies spatially and temporarily, in both along-shelf and

cross-shelf directions [8]. Furthermore, on the southeast continental shelf the sub inertial response to wind forcing is essentially barotropic [9]. For the hydrodynamic model in this study, it is important to note that the targeted OWF projects falls within the continental shelf and are mainly influenced by barotropic processes, with wind stress, tides, and river discharges being the most relevant factors. Consequently, a 2D barotropic hydrodynamic model was employed. Although extensively validated against all available water level and current measurements, it is important to note that the results of the HD model do not represent the baroclinic current systems and should be used with caution.

In summary, the careful assessment of the oceanographic and meteorological processes is a crucial step when producing an accurate regional metocean atlas. In the present modelling effort, significant attention was given to the preliminary selecting the set of models' inputs, including the representation of ocean currents in the wave models.

3. STUDY METHOD

In this section, the spectral wave and 2D hydrodynamic models are briefly described. The section will present the models domains extent, the available measurements used for models' validation, the model input data (bathymetry, atmospheric forcing, and boundary conditions) and the models setup. The complete description of these models' implementation and validation are publicly available through the [MOODv2 Web App \(metocean-on-demand.com\)](https://metocean-on-demand.com).

The 2D Hydrodynamic model was implemented with the MIKE21 Flow Model Flexible Mesh (FM) version 2024 [10]. This is a modelling system for two-dimensional (2D) free-surface depth-averaged flows that is developed and maintained by DHI and offered as part of MIKE Powered by DHI². The model system is based on the numerical solution of the 2D incompressible Reynolds-averaged Navier-Stokes equations subject to the assumptions of Boussinesq and hydrostatic pressure.

The wave model was implemented with the version 2024 of MIKE 21 SW Spectral Wave FM model [11] developed and maintained by DHI and offered as part of MIKE Powered by DHI. The wave model simulates the growth, decay and transformation of wind-generated waves and swells in offshore and coastal areas.

3.1 Model Domains and Bathymetry

The model domains were designed to cover the main offshore wind farm (OWF) projects with open request for environmental license in Brazil (as for 18-01-2024 according to IBAMA) and the planned offshore areas in Uruguay according to National Fuel, Alcohol and Portland Administration (ANCAP, in Spanish). Due to the great extension of the interest area, two domains were defined, one covering the northern Brazilian coast (BR_N) and one covering the southeast/south Brazilian coast plus the Uruguay OWF interest areas (BR_S). Figure 3 presents the mesh model domains extent and the location of the available measurements used for the model's validation. The BR_N model spans from longitudes 50°W to 22°W and latitudes 10°S to 2°N. The BR_S model spans from longitudes 58°W to 32°W and latitudes 42°S to 14°S. The spatial discretization of both models uses an unstructured flexible mesh with varying resolution from coarse elements offshore (~27km) to finer elements near the coastline (~3 km).

The bathymetry information for the generation of each model mesh was sourced from the C-MAP database³, derived from local nautical charts, complemented with GEBCO-2021 database⁴, with 15 arc seconds resolution, which corresponds to ±450 m. For the land boundary data, high-resolution data from GSHHS⁵ was used.

² The user guide and scientific documentation of all MIKE21 models and modules can be found here: [MIKE 21 Documentation \(mikepoweredbydhi.help\)](https://mikepoweredbydhi.help)

³ <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-c-map>

⁴ https://www.gebco.net/about-us/news-and-events/gebco_08_release.html

⁵ <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/gshhs.html>

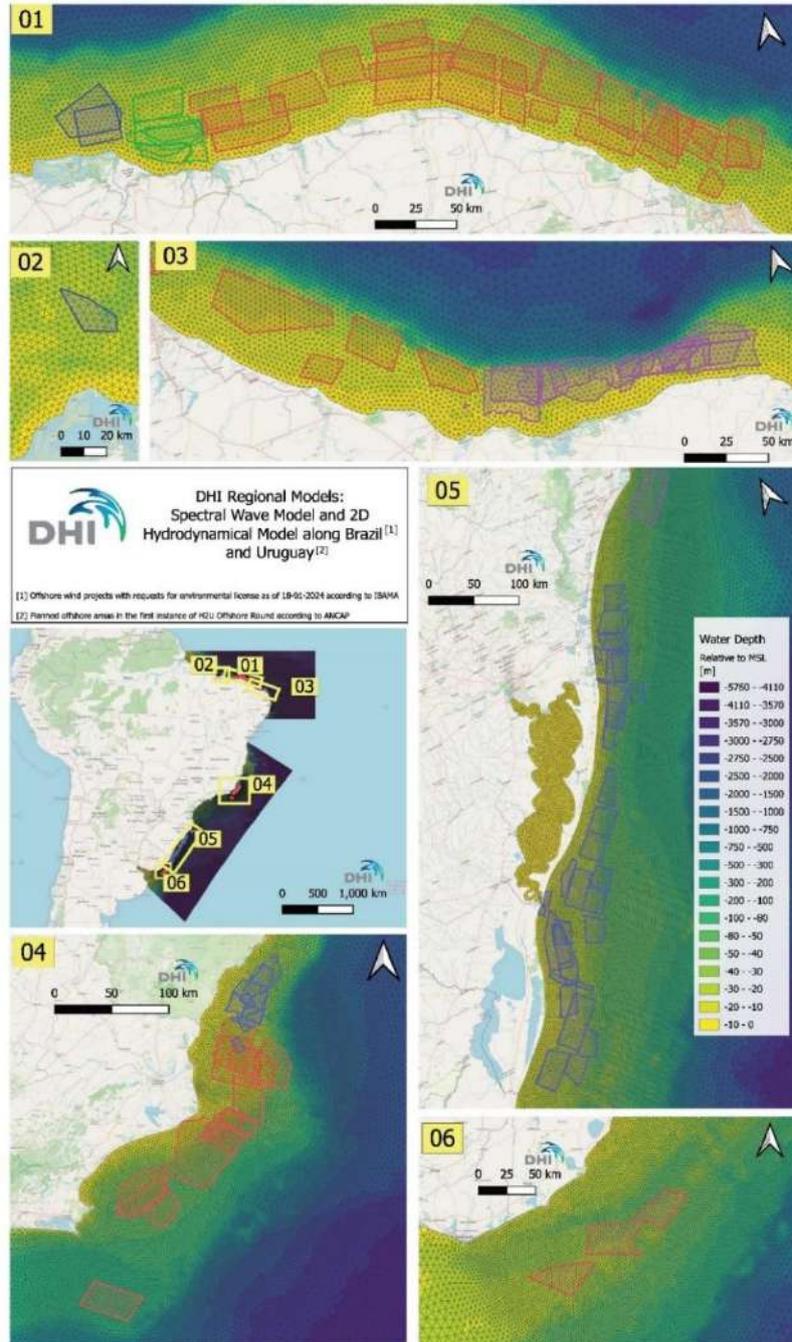


Figure 3: Regional spectral wave and 2D hydrodynamical model meshes domain and bathymetry and the offshore wind projects planned for Brazil and Uruguay.

3.2 Available Measurements

The wave measurements used for the calibration of the spectral wave models were obtained from PNBOIA (11 stations), SIMCosta (1 station), and RedeOndas (4 station), which contain data for different measuring stations for the period 2002-2023, depending on the station and source. The datasets contain Significant Wave Height (H_{m0}), Mean Wave Direction (MWD), and Peak Wave Period (T_p), depending on the station and source. The location and complete description of all stations used for validation can be found in the validation reports accessible through the MOOD Web portal.

Water level datasets were obtained from SIMCosta (7 stations), IBGE-RMPG (4 station) and GLOSS (1 station), which contain data for different measuring stations for the period 2001-2023, depending on the station and source. For the present study, twelve (12) stations were used for the water level validations.

Current datasets were obtained from SIMCosta project. The number of available measurements for current is significantly smaller when compared to water levels measurements, therefore the assessment of the HD model current field is slightly more restricted to those specific areas where measurements are available. For the present study, two (2) stations were used for the current validations.

Additionally, altimetry data was used to validate modelled wave heights (H_{m0}) for the period from 2013 to 2023. The altimetry data were obtained from European Space Agency (ESA⁶) as pre-processed data made available via Marine Observation Data (dhigroup.com).

3.3 Hydrodynamic Model Setup

The 2D Hydrodynamic model uses the fifth generation ECMWF reanalysis (ERA5) wind and pressure fields as atmospheric forcing [12]. The boundary conditions rely on the global ocean tide model DTU10 from the Technical University of Denmark, which was developed based on FES2004 (Finite Element Solutions) and the 'response method' [13] using the latest seventeen years multi-mission measurements from TOPEX/POSEIDON (phase A and phase B), Jason-1 (phase A and phase B) and Jason-2 satellite altimetry for sea level residuals analysis, the harmonic coefficients correspond to the new global ocean tide model are developed [14]. For the bed resistance a varying Manning number has been applied. The Manning number were based on the map of surface sediments of the Brazilian Continental Shelf published by the Geological Survey of Brazil [15]. The Hydrodynamic models include the main riverine discharges, including, but not limited to, the Amazon and Pará river for the northern model domain, the Paraíba do Sul, Itajaí-Açú, Doce, Plata River and the Patos Lagoon discharges for the southern model domain. These sources are specified as daily discharges time series and are based on Global Flood Awareness System (GloFAS)⁷.

The final hydrodynamic setup for both domains (BR_N and BR_S) was based on an extensive calibration/validation process against available measurements within the study domain and DHI's expertise. The model setup was 2D barotropic, with wind forcing based on ERA5 wind fields. Tidal potential was included, and the boundary conditions were derived from the DTU10 global ocean tide model, implemented as Flather conditions with pressure corrections. Detailed information about the model setup can be found on the MOOD web portal.

3.4 Spectral Wave Model Setup

From DHI's experience, the use of ERA5 winds yields accurate wave conditions during normal optional wind speed ranges up to ~10-12 m/s, but generates an underestimation of the peak wave events. As such, ERA5 wind speeds larger than $WS_{10>12}$ m/s were modified by DHI in the wind fields used to force the wave model as an intermediate calibration step that goes into the numerical wave model. The ERA5 wind model used as atmospheric forcing for the spectral wave model is called 'ERA5 modified', and the details on the correction/calibration of the model are given in [16]. The offshore open boundaries were obtained from DHI's Global Wave Model [17], which provided directional spectra along the open boundaries. The water levels were obtained directly from the BR_S and BR_N hydrodynamic models. The ocean currents were derived from Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) global reanalysis and analysis product⁸ and accounts for mesoscale and tidal spatially and temporally varying current. Both water level and current were included as an input to the spectral wave model to account for such spatial and temporal variations.

The regional wave model's setup was based on an extensive calibration/validation process against available wave measurements within the study domain and DHI's expertise. The model setup considered

⁶ [European Space Agency \(esa.int\)](https://esa.int)

⁷ [River discharge and related historical data from the Global Flood Awareness System](#)

⁸ [CMEMS-GLO-PUM-001-030.pdf \(copernicus.eu\)](#) and [CMEMS-GLO-PUM-001-024.pdf \(copernicus.eu\)](#)

a fully spectral in-stationary mode, with wind forcing based on ERA5-Modified wind fields. The parameterizations for the source terms for wind input and dissipation terms were based on Arduin et al. (2010) [18], and the boundary conditions were 2D action density spectra varying in time and along a line from DHI's Global Wave Model. Detailed information about the model setup can be found on the MOOD web portal.

4. Results

The regional atlas has been available on DHI's Metocean-on-Demand Web portal (MOODv2 Web App (metocean-on-demand.com) since April 2024, featuring the results of high-resolution hydrodynamic and spectral wave models for Brazil's coastal regions, particularly in the OWFs region. The models accurately represented the main patterns reported in the literature, such as the influence of frontal systems on water level, currents, and waves in the south-southeast region. They also captured the seasonal wave field patterns in the northern region, especially the impact of the seasonal shift of the ITCZ. Additionally, the models provided an improved representation of wave height in the northern region compared to available global datasets, with respect to the influence of the North Brazil Current on the wave field. Selected results and validation are presented below. As an example, Figure 4 presents the average Significant Wave Height between the years 2017 and 2018 in the model domains. For full access to all results, consult the MOOD portal.

4.1 Available Data

The available spectral wave model results comprise all relevant bulk parameters for the total spectrum as well as for the swell and wind sea partition. The hydrodynamic model results comprise water level, current speed, and direction. Hourly results are available for every grid point from Jan-1993 to Dec-2023 (Table 1).

Table 1: Regional Atlas output description

Metadata	Description	
Available Variables	Spectral Wave Model Significant Wave Height (Hm0), [m] Peak Wave Period (Tp), [s] Mean Wave Period (T01), [s] Zero-crossing Wave Period (T02), [s] Peak Wave Direction (PWD), [Deg. N. (coming from)] Mean Wave Direction (MWD), [Deg. N. (coming from)] Directional Standard Deviation (DSD), [degree] * All variables from Total spectrum, Swell and Sea	2D Hydrodynamic Model Water Level (WL) [m] Current Speed (CS) [m/s] Current Direction (CD) [Deg. N. (going-to)]
Temporal range and resolution	Hourly output. Start date; 1993-01-01 12:00:00 AM; End Date: 2023-12-31 11:00:00 PM	
Geographical Resolution	3 km coastal areas to 27 km offshore boundary	

The full wave spectra are available for specific pre-defined output points, with 0.5 degrees resolution up to approximately 200 km from the coastline and with 2 degrees resolution in the open ocean – especially suited for nesting local coastal and estuarine spectral wave models.

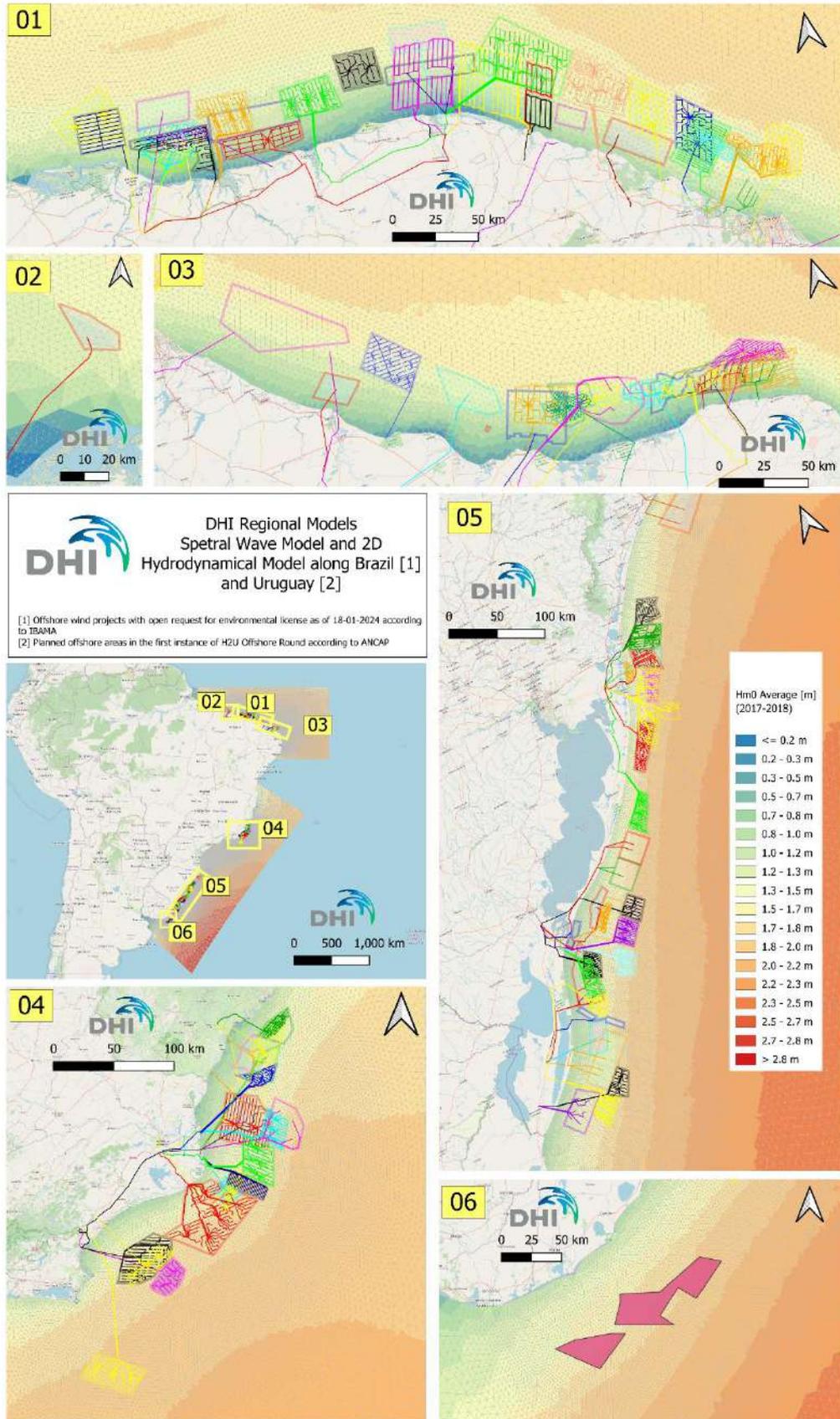


Figure 4: Example of the Spectral Wave Model results statistics (mean Significant Wave Height) covering all OWF projects over Brazilian and Uruguayan waters.

4.2 Results Validation

The complete set of validation plots for all available stations are presented in the validation reports publicly available at the MOOD Web portal (MOODv2 Web App (metocean-on-demand.com)). In this chapter a summary of the comparison statistics is presented for all available stations, as well as some examples of scatter comparison plots.

Additionally, satellite derived H_{m0} comparisons were assessed enabling a spatial assessment of the spectral wave model accuracy over the model domains. The altimetry comparison was done by calculating the spatially varying bias for H_{m0} in bins of 0.5×0.5 degrees, for 2013-2023 (11 years).

As shown in Figure 5, the developed spectral wave model presents a very low BIAS over the entire domain, showing an improved behavior when compared to the performance of the global reanalysis from ECMWF (ERA5) at these regions. This was achieved through a combination of factors such as considering the time and spatially varying current field in the wave propagation terms and the detailed calibration of the air-sea interaction parameters as well as the bottom friction specification and enhanced grid resolution.

Figure 6 presents an example of scatter plots and dual-rose plots comparing the modelled and measured data for Current Speed and Significant Wave Height for two chosen stations. An excellent agreement both for the energy and direction can be noted for both stations and variables. The complete set of validation plots for all available stations are presented in the validation reports, accessible through the MOOD Web portal.

Table 2, Table 3 and Table 4 present the summary of the quality indexes - BIAS, Correlation Coefficient (CC), RMSE and Peak Ratio (PR) - for all compared stations that cover most of the domain. It should be noted that the South/South-East domain is more densely populated with available stations. For H_{m0} , the mean RMSE is 0.26, the average BIAS is 0.03 m, average CC is 0.91 and the average Peak Ratio is 1.01. For T_p , the mean RMSE is 1,91 s, the average BIAS is 0.06 s, average CC is 0.68 and the average Peak Ratio is 1.1. For current speed, the mean RMSE is 0.14 m/s, the average BIAS is 0.01 m/s, average CC is 0.63 and the average Peak Ratio is 1.05. For water level, the mean RMSE is 0.11 m, the average BIAS is 0.02 m, average CC is 0.93 and the average Peak Ratio is 1.02.

Overall, a highly satisfactory validation was achieved for all observed variables considering the available observations. The dataset can be considered well suited for assessing both the operational and extreme conditions throughout the domains. It is important to highlight that the focus of the calibration effort was towards the OWF project's main regions, and therefore, the dataset must be used with caution elsewhere. For example, results pertaining to areas near the Amazon River mouth, Marajo Bay, and Sao Marcos Bay should be interpreted with caution due to the incomplete representation of estuarine processes in these regions, such as baroclinic pressure gradients.

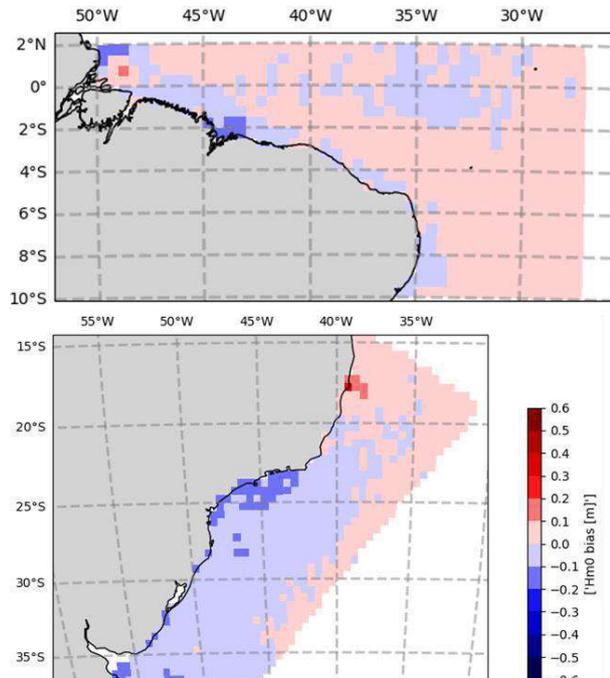


Figure 5: H_{m0} comparison of altimetry data and model results showing Bias (top panel) and Scatter Index (bottom panel). Comparison for the period of 2013-01-01 to 2023-12-31.

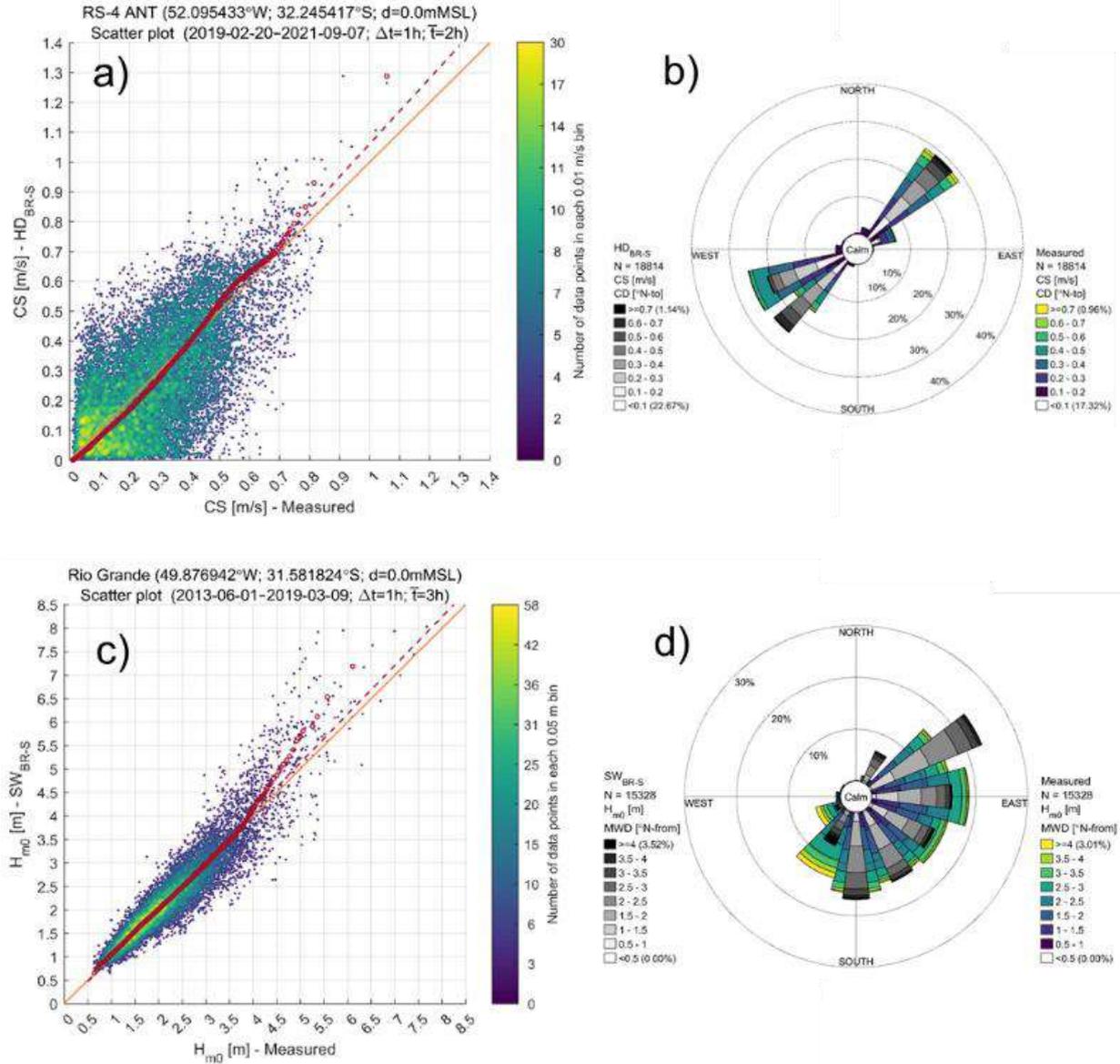


Figure 6: Scatter plots and dual-rose plots of modelled against measured data. In the top panel, current speed comparison for RS-4 station (a and b) and in the lower panel, H_{m0} comparison for Rio Grande station (c and d).

Table 2: Statistical parameters of H_{m0} [m] and T_p [s] considering the validation stations. The table shows the statistical parameters (N, BIAS, AME, RMSE, SI, EV, CC, PR) considering the validation stations for H_{m0} [m].

Station Name	Hm0				Tp			
	BIAS [m]	RMSE [m]	CC	PR	BIAS [s]	RMSE [s]	CC	PR
Fortaleza	0.03	0.17	0.89	0.91	0.96	2.30	0.76	1.24
Recife	0.21	0.26	0.91	1.04	1.42	2.82	0.40	1.21
noronha	0.22	0.27	0.88	0.99	1.51	2.66	0.32	1.34
pernambuco	0.14	0.18	0.94	1.00	0.06	1.67	0.69	1.11
Vitoria	0.08	0.19	0.93	0.96	-0.01	1.73	0.76	1.10
Itaguaí	-0.09	0.23	0.93	0.84	-0.10	1.72	0.72	1.12
Cabofrio2	0.06	0.25	0.92	1.07	0.08	1.39	0.84	1.10
alcatrazes	-0.22	0.3	0.95	1.10	-0.39	1.76	0.73	1.17
Santos-bm01	0.00	0.28	0.93	1.10	0.05	1.73	0.73	1.05
Santos-ax24	-0.02	0.22	0.95	1.08	0.01	1.54	0.78	0.93
Floripa	-0.10	0.28	0.89	1.02	-1.24	2.05	0.69	1.00
Tramandai	0.01	0.18	0.92	0.92	0.34	2.01	0.60	1.02
Rio Grande	0.02	0.31	0.93	1.17	-0.19	1.30	0.79	1.10
RS-5	-0.03	0.21	0.91	0.85	-0.40	1.88	0.73	1.08
Cassino	0.25	0.43	0.81	0.90	-0.87	2.71	0.58	1.07
Minuano	-0.13	0.34	0.94	1.13	-0.28	1.30	0.80	1.03
MEAN	0.03	0.26	0.91	1.01	0.06	1.91	0.68	1.10

Table 3: Statistical parameters of WL [m] considering the validation stations. The table shows the statistical parameters (N, BIAS, AME, RMSE, SI, EV, CC, PR) considering the validation stations for WL [m].

Station Name	BIAS [m]	RMSE [m]	CC	PR
Pecem	0.03	0.08	0.99	0.96
fort	0.03	0.08	1.00	0.95
Suape	0.00	0.08	0.99	0.90
maca	0.00	0.10	0.96	0.99
arca	0.02	0.08	0.97	0.99
DHN	0.01	0.11	0.94	1.01
ubatuba	0.01	0.10	0.95	1.01
Ilhabela	0.02	0.11	0.95	1.05
imbi	0.01	0.15	0.87	1.11
Imbituba	-0.02	0.13	0.91	1.11
Tramandai	0.02	0.15	0.84	1.05
Rio_Grande_2	0.09	0.20	0.76	1.05
MEAN	0.02	0.11	0.93	1.02

Table 4: Statistical parameters of CS [m/s] considering the validation stations. The table shows the statistical parameters (N, BIAS, AME, RMSE, SI, EV, CC, PR) considering the validation stations for CS [m/s].

Station Name	BIAS [m/s]	RMSE [m/s]	CC	PR
RS-4_ANT	-0.01	0.15	0.63	1.16
RS-5	0.02	0.13	0.63	0.94
MEAN	0.01	0.14	0.63	1.05

4.3 Accessing the Data

The regional atlas results can be accessed through the [MOODv2 Web App \(metoccean-on-demand.com\)](https://moodv2.metoccean-on-demand.com) DHI's portal for ordering metocean data. The DHI's interactive WEB portal offers metocean data on demand (ocean, waves, and atmosphere) for global and high-resolution regional models (Figure 7). The metadata as well as the complete validation reports are available for consultation.

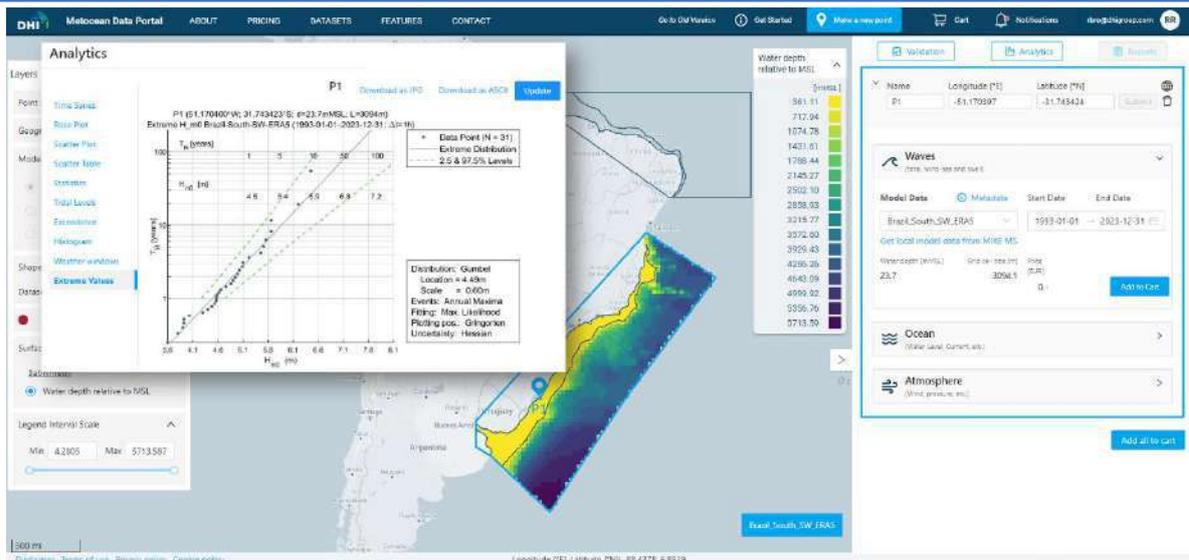


Figure 7: Snapshot of the interactive MOOD (Metocean-On-Demand) DHI's WEB portal for ordering metocean data. The portal offers global and high-resolution regional metocean models results, as well as providing analytics for time series, such as rose plot, scatter plot, statistics, and extreme values (highlighted).

6. FINAL CONSIDERATIONS, CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

The development of the regional spectral wave and 2D hydrodynamic models in this study successfully achieved comprehensive coverage of the Brazilian and Uruguayan coasts. The domains, divided into northern and southern/southeastern regions, were designed to capture the distinct oceanographic and meteorological characteristics of these areas. This strategic division ensured accurate representation of the diverse conditions influencing offshore wind farm (OWF) projects, providing a robust framework for current and future offshore energy initiatives.

Validation of the models against extensive measurement data, including wave parameters, water level, and current, demonstrated high accuracy and reliability. The results indicated minimal biases and errors, affirming the models' precision in simulating real-world conditions. The use of satellite altimetry data further validated the wave height results across the entire domain.

Future studies should focus on improving the representation of estuarine processes, such as baroclinic pressure gradients, particularly in areas like the Amazon and Plata River mouths and São Marcos Bay. Enhancing these aspects will increase the models' accuracy in these regions and adjacent coastal areas. Additionally, incorporating climate change projections in new simulations will provide valuable insights into future metocean conditions, helping assess the long-term viability and resilience of offshore energy projects under changing climatic conditions.

The availability of high-quality metocean data through the MOOD portal significantly enhances the potential for Front-End Engineering Design (FEED) studies. Detailed representation of metocean conditions supports more accurate and efficient design processes, contributing to the overall feasibility, safety, and economic viability of these projects.

The MOOD portal (Figure 7) is the to-go online platform for accessing comprehensive metocean data generated by these models. By offering an interactive and user-friendly interface, the portal facilitates the retrieval of relevant data for various applications. The inclusion of validation reports and metadata ensures transparency and aids users in understanding the context and reliability of the data provided.

In conclusion, the regional spectral wave and 2D hydrodynamic models developed in this study provide a highly accurate and comprehensive metocean dataset for the Brazilian and Uruguayan coasts. Validation against extensive measurement data confirms their reliability and precision, making them a valuable resource for offshore energy projects. The data, accessible through the MOOD portal, supports FEED studies and other applications, promoting the efficient and economic development of offshore energy solutions.

REFERENCES

- [1] IMarEST, "Metocean Procedures Guide for Offshore Renewable," no. 2, p. 26, 2018.
- [2] EPE, "Geração Eólica Offshore: Considerações sobre a limitação de área a ser cedida," *NOTA TÉCNICA EPE/DEE/035/2023-R1*, 2024.
- [3] EPE, "Geração Eólica Offshore: Considerações sobre valor devido à União pela cessão de área," *NOTA TÉCNICA EPE/DEE/036/2023-R1*, 2024.
- [4] R. N. Candella, "Characteristics of ocean waves off Fortaleza, CE, Brazil, extracted from 1-year deep-water measured data," *Ocean Dynamics* 69, pp. 1239–1251. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01293-z>, 2019.
- [5] C. P. Dereczynski and W. F. Menezes, "Meteorologia da Bacia de Campos," In: *Martins, R.P., Grossmann-Matheson, G.S., editores. Meteorologia e Oceanografia. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, v. 2., pp. 1-54*, 2015.
- [6] H. Rapizo, T. H. Durrant and A. V. Babanin, "An assessment of the impact of surface currents on wave modeling in the Southern Ocean," *Ocean Dynamics* 68, pp. 939-955. <https://doi.org/10.1007/s10236-018-1171-7>, 2018.
- [7] H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, S. . Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, ... and J.-N. Thépaut, "The ERA5 global reanalysis.," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>, 2020.
- [8] B. M. Castro, F. P. Brandini, A. M. S. Pires-Vanin and L. B. Miranda, "Multidisciplinary oceanographic processes on the Western Atlantic continental shelf between 4 N and 34 S," in *The Sea*, Cambridge, Harvard University Press, 2006, pp. 1-39.
- [9] M. Dottori and B. M. Castro, "The response of the Sao Paulo Continental Shelf, Brazil, to synoptic winds," *Ocean dynamics*, vol. 59, no. 4, pp. 603-614, 2009.
- [10] DHI A/S, "MIKE 21 FLOW MODEL FM Hydrodynamic Module, Scientific Documentation," DHI, Hørsholm, 2024.
- [11] DHI A/S, "MIKE 21 SPECTRAL WAVE MODULE Scientific Documentation," 2024.
- [12] H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, G. Biavati, A. Horányi, J. Muñoz Sabater, J. Nicolas, C. Peubey, R. Radu, I. Rozum, D. Schepers, A. Simmons, C. Soci, D. Dee and J.-N. Thépaut, "ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present," Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>. [Accessed 12 December 2023].
- [13] W. H. Munk and D. E. Cartwright, "Tidal Spectroscopy and Prediction," *Philos. Trans. R. Soc.*, London, 1966.
- [14] O. B. A. Yongcun Cheng, "Improvement of global ocean tide models," in *Altimetry for Oceans and Hydrology OST-ST Meeting*, Technical University of Denmark, 2010.
- [15] G. T. d. M. Dias, M. Robrini, J. S. S. Freire and A. Figueiredo, "Geologia dos sedimentos superficiais da plataforma continental brasileira," CPRM, Brasília, DF, 2007.
- [16] DHI A/S, "ERA5 Wind: Validation and Comparison. Project Nr. 11826846, Final 1.0," 2023.
- [17] DHI A/S, "Global Atlas of Siting Parameters Offshore: DHI Global Wave Model: Set-up, Calibration and Validation," 2023.
- [18] F. Ardhuin, E. Rogers, A. V. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, ... and F. Collard, "Semiempirical Dissipation Source Functions for Ocean Waves. Part I: Definition, Calibration, and Validation," *American Meteorological Society*, vol. 40, no. 9, pp. 1917 - 1941, 2010.

Impacto dos Créditos de Carbono para Setor Eólico

Diego Flaresso de Oliveira

GSS Carbono e Bioinovação

diego@gss.eco

RESUMO

Considerando o contexto atual do setor elétrico, com foco especial no segmento eólico, foi realizado uma análise detalhada do impacto de projetos de carbono associados a empreendimentos de energia renovável. Nesta investigação foi abordado a aplicabilidade e elegibilidade desses projetos com base nas metodologias e ferramentas do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), programa de descarbonização das Nações Unidas. Foi destacado a viabilidade de implementar um projeto de carbono em um empreendimento exemplar de 200 MW. Em um cenário conservador, foi quantificado o potencial de remuneração adicional por cada MWh injetado na rede por um empreendimento eólico associado a um projeto de carbono. Além disso, explorou-se estratégias para agregar maior valor aos créditos de carbono. Isso inclui a possibilidade de incorporar co-benefícios aos projetos e buscar elegibilidade em programas de descarbonização, como o CORSIA. Os resultados obtidos neste estudo oferecem uma base sólida para a tomada de decisões sobre o desenvolvimento de projetos de carbono em empreendimentos eólicos.

Palavras-chaves:

Descarbonização; Energia Eólica; Mercado de Carbono, Sustentabilidade, Co-Benefícios, Adicionalidade

ABSTRACT

Considering the current context of the electricity sector, with a special focus on the wind energy segment, a detailed analysis was conducted on the impact of carbon projects associated with renewable energy ventures. This investigation addressed the applicability and eligibility of these projects based on the methodologies and tools of the United Nations Clean Development Mechanism (CDM), a decarbonization program. It highlighted the feasibility of implementing a carbon project in an exemplary 200 MW wind energy venture. In a conservative scenario, the additional remuneration potential per MWh injected into the grid by a wind project associated with a carbon project was quantified. Additionally, strategies were explored to add greater value to carbon credits. This includes the possibility of incorporating co-benefits into projects and seeking eligibility in decarbonization programs such as CORSIA. The results obtained in this study provide a solid foundation for decision-making regarding carbon project development in wind ventures.

Keywords:

Decarbonization; Wind Energy; Carbon Market; Sustainability; Co-Benefits, Additionality

1. INTRODUÇÃO

A transição para fontes de energia renovável tem sido uma prioridade global na busca por soluções sustentáveis para os desafios energéticos e ambientais que o mundo enfrenta. No contexto brasileiro, a energia eólica emergiu como uma peça fundamental nessa transição, oferecendo um potencial significativo para a geração de eletricidade limpa e renovável. Nos últimos anos, é notável o crescimento no número de empreendimentos eólicos no Brasil, impulsionado pela busca por alternativas mais sustentáveis e pela crescente demanda por energia renovável.

Um dos mecanismos mais eficazes para incentivar e viabilizar esses projetos é o crédito de carbono. Este sistema permite que projetos que reduzam emissões de gases de efeito estufa gerem créditos que podem ser comercializados, proporcionando uma fonte adicional de receita e tornando investimentos em energias renováveis ainda mais atrativos. No Brasil, essa prática tem sido particularmente relevante, não só para a energia eólica, mas também para a solar, que tem visto uma expansão significativa.

Para avaliar a viabilidade de um projeto de carbono em um empreendimento de geração de energia renovável, foi utilizada a metodologia das Nações Unidas para definir a adicionalidade por 'prática comum'. Com essa abordagem, podemos avaliar a elegibilidade de um parque eólico de 200 MW. Superada a análise de adicionalidade do projeto de carbono, foi examinada a influência do preço dos créditos de carbono em comparação com o preço da energia e seu impacto na viabilização dos empreendimentos energéticos. Por meio de uma análise conjuntural, identificou-se oportunidades no mercado de carbono e iniciativas internacionais que podem influenciar o preço dos créditos de carbono. O objetivo é demonstrar como os projetos de carbono podem ser fundamentais para o desenvolvimento e a viabilização de empreendimentos de energia renovável no Brasil.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Indústria Eólica no Brasil: Desafios e Perspectivas

Desde 2022, a indústria eólica no Brasil enfrenta um de seus piores momentos em décadas, marcado por um processo acelerado e intenso de desindustrialização. Esse fenômeno resulta não apenas na perda de inúmeros postos de trabalho, mas também na desmobilização de cadeias produtivas inteiras. O impacto é sentido em todos os níveis, desde pequenos negócios locais, como restaurantes em João Câmara - um importante centro de suporte para diversos parques eólicos na região -, até grandes corporações como a General Electric, que interrompeu a venda de turbinas eólicas no país.

A indústria eólica, assim como o setor elétrico como um todo, enfrenta dificuldades principalmente devido ao excesso de oferta de energia no mercado interno, o que resulta na queda dos preços e desestimula a construção de novos parques eólicos. A falta de previsibilidade e coordenação pode resultar em investimentos subutilizados e em uma infraestrutura energética desalinhada com as necessidades e capacidades reais do país.

Além do excesso de oferta, a conjuntura econômica do país não apresenta grandes estímulos para um crescimento significativo do PIB nem para a reindustrialização, que poderiam impulsionar um aumento da demanda por eletricidade. As mudanças climáticas adicionam uma camada de incerteza e risco ao setor,

tanto na perspectiva da previsibilidade e segurança na capacidade de geração quanto na integridade e manutenção dos ativos físicos.

Os potenciais impactos das mudanças climáticas para o sistema elétrico incluem problemas na oferta de recursos de geração devido a variações nos volumes de chuva e vazão, radiação solar e ventos. Elas também podem afetar a eficiência de equipamentos de geração e transmissão, levar a uma maior demanda de eletricidade devido ao aumento das temperaturas e ampliar riscos às infraestruturas em consequência dos eventos climáticos extremos. Com as recentes tragédias observadas no estado do Rio Grande do Sul, o risco climático torna-se um componente crucial na avaliação de novos empreendimentos estruturantes do setor elétrico. Na figura 1, é possível observar a crescente ocorrência de eventos de catástrofes climáticas no planeta de 1980 a 2018. Dada a natureza global dos efeitos das mudanças climáticas, mecanismos internacionais são necessários para mitigá-las.

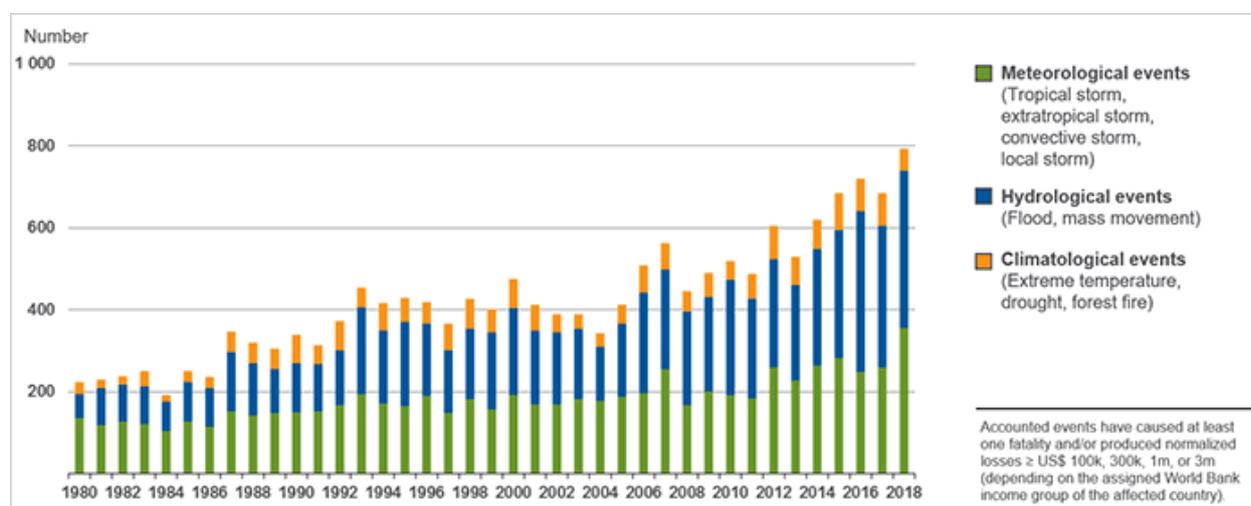


Figura 1 – Número de eventos climáticos relevantes por perfil. (Fonte: Insurance Information Institute – 2019)

Considerando os diversos desafios enfrentados pela indústria eólica no Brasil, que incluem distorções regulatórias, falta de infraestrutura e a desindustrialização do setor, o preço da energia se destaca como o fator mais crítico. Na perspectiva dos geradores, o preço da energia é um indicador crucial que determina se o empreendimento será capaz de cobrir todos os custos envolvidos, remunerar adequadamente o capital investido e compensar os riscos inerentes à atividade. Se os preços praticados no mercado não forem suficientes para cobrir os custos de operação, manutenção e expansão dos parques eólicos, além de proporcionar um retorno adequado sobre o investimento, os geradores enfrentarão dificuldades em manter suas operações e em atrair novos investimentos. Esse cenário pode levar à estagnação do setor e à perda de espaço para fontes de energia não renováveis, comprometendo os objetivos de sustentabilidade e diversificação energética do país.

2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - Mudanças Climáticas e Mercado de Carbono

A necessidade urgente de gerenciar as emissões de gases de efeito estufa tem se tornado uma demanda crucial diante das crescentes preocupações globais sobre as mudanças climáticas. Diversos mecanismos de controle e administração dessas emissões foram desenvolvidos em diferentes níveis: multinacional, nacional e independente.

Em 1997, na cidade de Quioto, no Japão, com a participação de representantes de 159 nações, foi realizada a terceira Conferência das Partes (COP3). Este evento culminou na adoção, por consenso, do Protocolo de Quioto, que se estabeleceu como um dos marcos mais importantes no combate à mudança climática desde a criação da Convenção. Este acordo internacional estabeleceu metas de redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) para os países industrializados. Como parte desse acordo, foi desenvolvido o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Quioto, que permite aos países do Anexo I (industrializados e desenvolvidos) cumprirem parte de suas metas de redução de emissões investindo em projetos de redução em países em desenvolvimento.

Essa primeira estruturação de um mercado de carbono possibilitou a formação de outros mercados regulados nacionais e subnacionais, concebidos de maneira independente por cada nação. Esses mercados utilizam regulamentações aplicáveis exclusivamente dentro de seus respectivos territórios, baseando-se em fundamentos e padronizações do mercado regulado internacional. Os mercados regulados nacionais emergiram como uma tentativa dos governos de administrar e limitar as emissões de GEE de forma controlada, atendendo às diferenças produtivas, políticas e culturais de cada nação.

Paralelamente, surgiu uma vertente inovadora: o mercado voluntário de carbono. Esse mercado permite a participação ativa de agentes da iniciativa privada, que não estão sujeitos a imposições de emissão, mas que desejam realizar ações climáticas por responsabilidade socioambiental voluntária. Baseado no mercado regulado, o mercado voluntário utiliza mecânicas e metodologias já existentes para expandir substancialmente o escopo do mercado de carbono. Isso permite que empresas, organizações e indivíduos contribuam voluntariamente para a redução das emissões, transcendendo as obrigações e regulamentações nacionais e internacionais.

2.3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - Mercado de Carbono Voluntário

O Mercado Voluntário de Carbono (VCM) emerge como uma extensão do mercado regulado, impulsionado pela iniciativa voluntária de reduzir e compensar as emissões de gases de efeito estufa. Inspirado nas diretrizes da UNFCCC e, em particular, nas normas da ISO 14064, o VCM se organiza em torno de Padrões de Carbono (comumente chamados de Standards), que desempenham um papel análogo ao da UNFCCC no mercado regulado, definindo as bases para o registro, validação e verificação de projetos de mitigação.

Esses padrões de certificação de carbono desempenham três funções essenciais: primeiro, elaboram, aprovam e atualizam os seus critérios para registro dos projetos de créditos de carbono, muitas vezes alinhando com programas internacionais e iniciativas de integridade; segundo, avaliam projetos de compensação de carbono conforme suas normas e metodologias aplicadas, primando pela transparência e qualidade do processo; e terceiro, operam (podendo em alguns casos terceirizar para plataformas estruturadas e de credibilidade) um sistema de registro para gestão (por parte dos proponentes dos projetos registrados) dos créditos de carbono permitindo a sua emissão, transferência e aposentadoria.

Em um contexto marcado pela ausência de uma regulamentação global marcada pelo período entre o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris, o Mercado Voluntário de Carbono assumiu uma importância

estratégica. Muitos dos critérios, princípios e metodologias empregados no mercado voluntário são herdados do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da UNFCCC. Com o tempo, o VCM amadureceu para se tornar uma versão sofisticada do mercado regulado, permitindo que os ativos de Redução Voluntária de Emissões (VERs) sejam criados pelos Standards e transacionados, para agentes secundários (trades e intermediários) como diretamente para os beneficiários da aposentadoria, expandindo este mercado para além das dimensões originalmente traçadas pelo protocolo de Quioto, em especial o MDL. Essa evolução abre portas para a participação de diversos setores e cria oportunidades para novos projetos climáticos e ainda de ganhos financeiros constituindo um mercado internacional.

Apesar de sua abrangência global e da diversidade de fatores que influenciam o Mercado Voluntário de Carbono (VCM) enfrenta um desafio crescente devido à proliferação dos padrões de certificação de carbono. Esse crescimento exponencial é motivado pela necessidade de adequação aos diferentes setores, adaptação às nuances culturais e contextuais. Essa descentralização permite uma maior adaptação e especialização do Standard de Carbono, entretanto atribui bastante complexidade ao mercado gerando diferentes protocolos para registro de projetos assim como créditos de carbono com diferentes características, apesar do padrão permanecer a tonelada de dióxido de carbono equivalente.



Figura 2. Linha do tempo dos Standards de Carbono do mercado voluntário – (Fonte: Hamerkop)

3. MÉTODO DO ESTUDO

3.1 Participação de projetos Eólicos no mercado de carbono

Os empreendimentos de energia renovável podem ser registrados como projetos de carbono em diversos padrões de carbono do mercado voluntário, e até o ano de 2021 no próprio Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), utilizando a metodologia "*Large-scale Consolidated Methodology: Grid-connected electricity generation from renewable sources*", conhecida pelo código ACM0002. Essa metodologia permite calcular o deslocamento da geração de energia elétrica da matriz energética (correspondente ao grid ao qual o empreendimento será conectado) com a entrada em operação de um empreendimento de energia renovável, além de definir a abordagem da análise de adicionalidade do projeto.

Um projeto de carbono deve demonstrar sua adicionalidade, ou seja, deve provar que a atividade proposta não ocorreria sem o incentivo dos créditos de carbono, ou que seu retorno sobre o equity seria muito baixo considerando a conjuntura econômica do país. Além disso, é necessário que o projeto possua uma metodologia válida que aborde sua atividade de forma precisa. A análise de adicionalidade é detalhada por uma ferramenta metodológica complementar denominada "*Tool for the Demonstration and Assessment of Additionality*" (Tool01), que se desdobra em diferentes ferramentas auxiliares para abordar etapas específicas da adicionalidade do projeto de carbono.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) registra um total de **1.646 empreendimentos de geração de energia renovável do tipo eólica**, em operação ou previstos para construção, representando uma potência outorgada de 55.455.721,86 kW. Desses, 30.639.353,86 kW já estão fiscalizados, representando um total de 15,12% da potência disponível operacional nacional.

Consultando os bancos de dados dos principais padrões de carbono do mercado voluntário como o Global Carbon Council (GCC), Verified Carbon Standard (VCS), Gold Standard (GS) e American Carbon Registry (ACR) e o MDL das Nações Unidas onde identificamos um total de **398 projetos eólicos registrados ou em processo de registro**, somando uma potência outorgada de 11.160.940 kW.

Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	% (Pot. Fiscalizada)
UHE	220	103.602.291,00	103.213.069,00	50,93%
UTE	3108	55.994.331,91	46.212.744,31	22,80%
EOL	1646	55.455.721,86	30.639.353,86	15,12%
UFV	21224	142.823.255,33	13.935.742,57	6,88%
PCH	522	7.045.758,22	5.822.656,57	2,87%
UTN	3	3.340.000,00	1.990.000,00	0,98%
CGH	688	864.428,88	849.546,88	0,42%
Total	27411	369.125.787,20	202.663.113,19	100,00%

Figura 3. Capacidade de Geração do Brasil. (Fonte: ANEEL)

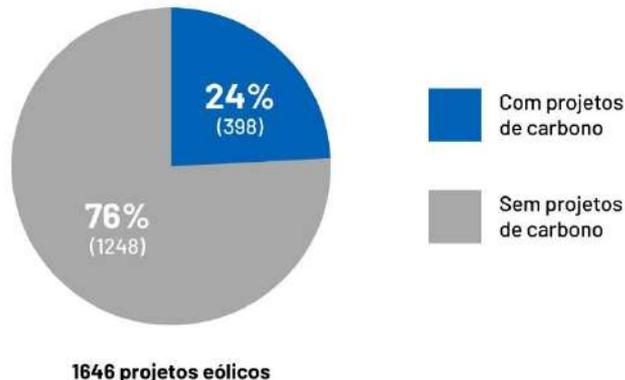


Figura 4. Porção de projetos registrados em programas de carbono. (Fonte: Autor)

3.2. Adicionalidade

A viabilidade de um projeto de carbono depende da sua adicionalidade, que para projetos de energia é avaliada por meio de duas análises distintas: a "Análise de prática comum" conforme a ferramenta metodológica Tool 24 – Methodological tool for Common Practice versão 3.1, e a "análise financeira" estabelecida pela ferramenta metodológica Tool 27 Investment analysis versão 13.0. Ambas as ferramentas do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).

Devido às variações significativas nos ambientes de investimento de cada empreendimento eólico, a análise de adicionalidade financeira não pode ser padronizada e requer uma abordagem minuciosa na elaboração da planilha financeira do projeto. Um parâmetro comum utilizado nesta análise é uma Taxa Interna de Retorno (TIR) do Equity, em termos reais, onde este indicador deve ser inferior a 10,37% ao ano. Este valor de benchmark é atualizado anualmente pelas Nações Unidas considerando a conjuntura econômica da nação em que o projeto é proposto e o segmento de atuação.

3.3 Prática Comum

A análise de prática comum possui cinco etapas sequenciais que devem ser abordadas de forma clara, utilizando dados abertos e fontes confiáveis. O resultado deve ser reproduzível pelo auditor responsável durante a etapa de validação do projeto, fase que precede o registro do projeto de carbono. Para fins de exemplo, consideraremos um empreendimento *Greenfield* de um complexo eólico com 200 MW de potência, onde o projeto foi concebido (materialização do projeto em algum contrato, como a assinatura de aquisição dos equipamentos ou a obtenção de alguma licença do órgão ambiental) em 01/01/2021 e com sua entrada em operação comercial projetada para 06/02/2024.

Etapa 1: Definir o Intervalo da Análise

A primeira etapa compreende definir o intervalo da análise. Neste caso, é calculado o intervalo de estudo como +/- 50% da capacidade total projetada ou do projeto proposto resultando em um intervalo de análise de 100 MW a 300 MW.



Figura 5. Intervalo de pesquisa (Fonte: Autor)

Etapa 2: Identificar todos os empreendimentos que atendem aos seguintes critérios:

(a) Área Geográfica: Devem estar na mesma área geográfica; neste caso, considera-se o país todo, ou seja, todos os empreendimentos em território nacional.

(b) Natureza e Funcionalidade: Projetos que tenham a mesma natureza e apliquem a mesma funcionalidade; neste caso, são todos os empreendimentos conectados à rede que geram energia elétrica. Para maior credibilidade, foram considerados dados de empreendimentos individuais da ANEEL, assim como o arranjo em complexos (tanto solares como eólicos) dos dados da ABEEOLICA e do ONS.

(c) Propósito do Projeto: Projetos que atendem ao mesmo propósito. Se for um projeto de retrofit ou melhoria de tecnologia, deve ser comparado com seus respectivos pares. Neste caso, estamos tratando de projetos de geração de energia.

(d) Modalidade de Geração: Projetos que gerem energia na mesma modalidade. No nosso caso, trata-se de um projeto de geração de energia elétrica.

(e) Intervalo de Capacidade: Projetos que estejam contidos dentro dos limites estabelecidos na Etapa 1, intervalo de 100MW a 300MW.

(f) Data de Operação Comercial: Projetos que tenham entrado em operação comercial antes do início do projeto em questão – 01/01/2021.

Abaixo está a sumarização da quantidade de empreendimentos que atendem aos critérios acima mencionados:

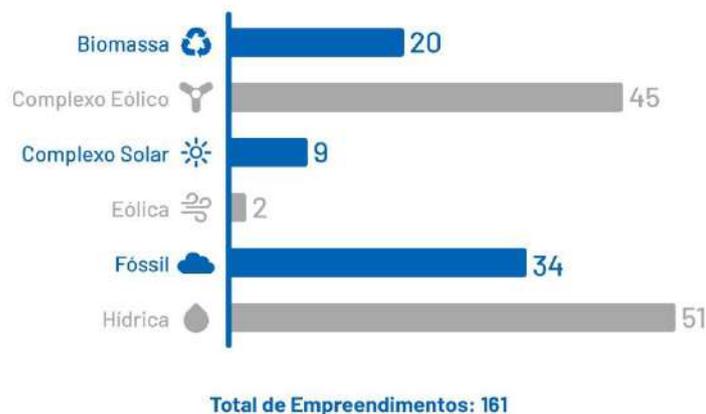


Figura 6. Distribuição dos empreendimentos identificados. (Fonte: Autor)

Etapa 3: Identificação dos Empreendimentos Registrados em Programas de GHG

Dos empreendimentos encontrados, é identificado aqueles registrados ou em processo de registro nos programas de carbono, como o CDM, Global Carbon Council (GCC), Verified Carbon Standard (VCS),

Gold Standard (GS) e American Carbon Registry (ACR). Os empreendimentos não registrados são identificados como *Nall*.

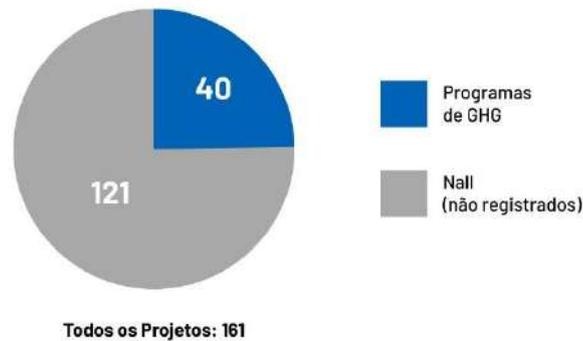


Figura 7. Projetos não registrados em programas de carbono - *Nall*. (Fonte: Autor)

Etapa 4: Identificação de Tecnologias Diferentes

Relativo aos empreendimentos identificados na Etapa 3, aqueles que aplicam tecnologias diferentes da eólica ou que apresentam fatores significativos que os diferenciam drasticamente do projeto proposto são relacionados. Os empreendimentos diferentes são identificados como *Ndiff*.



Figura 8. Distribuição dos empreendimentos diferentes - *Ndiff*. (Fonte: Autor)

Etapa 5: Cálculo do Fator F

O Fator F deve ser calculado, onde $F = 1 - (Ndiff/Nall)$, representando a proporção de projetos que usam uma tecnologia semelhante à do projeto proposto, que entregam a mesma produção ou capacidade.

A atividade do projeto não é adicional se o Fator F for maior que 0,2 e a diferença entre *Nall* e *Ndiff* for maior que 3, desta forma sendo considerada uma “prática comum”. Na análise do empreendimento exemplo, o Fator F é de 0,1111 e o cálculo $Nall - Ndiff$ é 21. Portanto, a atividade em questão é considerada adicional pela análise de prática comum. Apesar do significativo aumento no número de empreendimentos eólicos no Brasil, o cenário ainda se mostra promissor para novos projetos de carbono. Os projetos de carbono representam uma oportunidade valiosa para agregar valor aos empreendimentos, oferecendo um diferencial competitivo ao setor. A implementação de projetos de carbono pode não apenas remunerar melhor o MWh gerado, mas também destacar o compromisso com a sustentabilidade e a mitigação das mudanças climáticas, tornando os empreendimentos mais atrativos e rentáveis na sua incorporação.

3.4 – Precificação do Crédito de Carbono

A comercialização de créditos de carbono é uma etapa fundamental na luta contra as mudanças climáticas, consolidando todo o ciclo de trabalho e propósito de um projeto de carbono. A venda desses créditos não só subsidia, mas também incentiva projetos que promovem ganhos climáticos significativos.

A precificação dos créditos de carbono é um processo complexo e bastante volátil, principalmente devido a atual predominância do mercado voluntário de carbono. No entanto, mesmo nesse ambiente, é possível analisar dados históricos para definir um preço justo para um crédito hipotético, para o projeto eólico utilizado como exemplo da análise de adicionalidade.

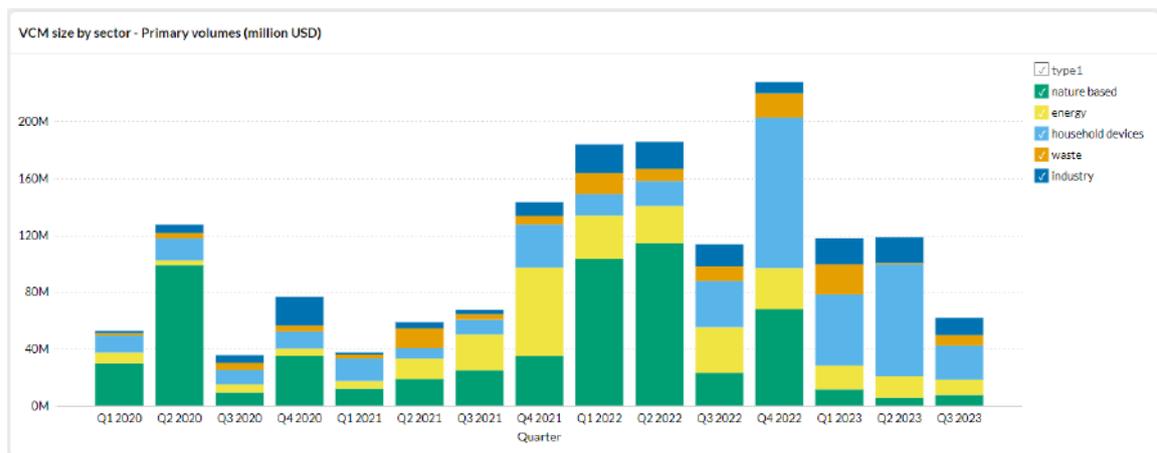


Figura 9. Volume Transacionado por tipo de projeto de carbono em ambiente voluntário (Fonte: Quantum Commodity Intelligence – Database 2024)

Na figura acima é destacado o volume de créditos de carbono comercializados no mercado voluntário (VCM) por tipologia de projeto. Destaque para as emissões de créditos de carbono em 2021, que correspondem aos projetos registrados no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), aproveitando a última oportunidade de registro no programa das Nações Unidas, que se encerrou no final de 2020.

CATEGORY	2022			2023			Percent Change		
	Volume (MtCO ₂ e)	Value (USD)	Price (USD)	Volume (MtCO ₂ e)	Value (USD)	Price (USD)	Volume	Value	Price
Forestry & Land Use	113.0	\$1.1 B	\$10.14	36.2	\$351.3 M	\$9.72	-68%	-69%	-4%
Renewable Energy	92.7	\$386.1 M	\$4.16	28.6	\$111.1 M	\$3.88	-69%	-71%	-7%
Chemical Processes/ Industrial Manufacturing	13.3	\$68.5 M	\$5.14	12.2	\$50.2 M	\$4.10	-8%	-27%	-20%
Household/ Community Devices	9.1	\$77.6 M	\$8.55	9.9	\$76.6 M	\$7.70	+10%	-1%	-10%
Energy Efficiency/ Fuel Switching	6.6	\$35.6 M	\$5.39	9.4	\$34.4 M	\$3.65	+43%	-3%	-32%
Agriculture	3.8	\$41.7 M	\$11.02	4.7	\$30.6 M	\$6.51	+24%	-26%	-41%
Waste Disposal	6.2	\$44.9 M	\$7.23	1.5	\$10.9 M	\$7.48	-77%	-76%	+3%
Transportation	0.18	\$770 K	\$4.37	-	-	-	-	-	-

Figura 10. Transações do Mercado Voluntário de Carbono (Fonte: Ecosystem Marketplace - 2024 SOVCM)

Analisando a Figura 10 conclui-se que apesar do valor total de mercado ter caído para todas as categorias de créditos, as causas desta queda variaram entre as categorias. O volume e/ou o preço médio das transações aumentaram em algumas categorias. As categorias de Eficiência Energética/Troca de Combustível, Agricultura e Dispositivos Domésticos/Comunitários cresceram em volume, aumentando 43%, 24% e 10%, respectivamente. Os créditos de Florestas e Uso da Terra e de Energia Renovável tiveram as maiores quedas brutas em volume, embora permaneçam os tipos de projetos mais populares em transações.

A queda no volume de transações de créditos de Energia Renovável pode ser uma consequência natural da diminuição na oferta desses créditos. As emissões nessa categoria diminuíram após um pico de novos projetos de Energia Renovável registrados em 2020 com emissões a partir de 2021.

Tendo em vista a natureza dos projetos de carbono de energia renovável, sua integridade é mais facilmente verificável em comparação com outros tipos de projetos. Por exemplo, os projetos REDD+ (desmatamento evitado) estão enfrentando uma queda de credibilidade, pois a geração de créditos de carbono é baseada em um cenário hipotético de desmatamento. Este problema de credibilidade levou o Verra, um dos principais standards de carbono, a revisar a metodologia aplicável para aumentar a confiança e a credibilidade desses projetos (transição da metodologia VM0015 para VM0055).

Embora o mercado carbono voluntário (VCM) tenha sofrido quedas em várias categorias, a análise detalhada revela oportunidades específicas para projetos de energia eólica. A redução no volume de transações de créditos de Energia Renovável, apesar de um pico de novos projetos em 2020, aponta para uma escassez de oferta que pode beneficiar novos projetos.

Os créditos de carbono de energia renovável, por sua vez, ocupam uma posição segura e de fácil aceitação no mercado. Adotando uma perspectiva conservadora, podemos considerar o preço médio para os projetos de energia renovável de \$3,88 dólares. Este valor é uma média que inclui projetos de diversas fontes de energia renovável, como os projetos de energia hidráulica, que normalmente possuem uma receptividade e valor menor em comparação com os projetos eólicos.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para quantificar o incremento financeiro na remuneração do MWh gerado pelas usinas eólicas, é essencial determinar o fator de emissão, que representa a quantidade de emissões evitada quando um MWh de energia renovável é injetado na rede do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Para um projeto de carbono, é utilizada a ferramenta metodológica complementar denominada "*Tool to calculate the emission factor for an electricity system*" (Tool07). Esta ferramenta demanda dados publicados pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). O MCTI calcula os fatores de emissão da rede, seguindo a metodologia aprovada pelo Conselho Executivo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (CDM) da UNFCCC. O objetivo é estimar a contribuição de um projeto de geração de eletricidade para a rede nacional em termos de redução de emissões de CO₂.

O fator de emissão mais recente, de 2023, deve ser utilizado para projetar as emissões evitadas por um projeto de carbono de energia renovável. Para empreendimentos de energia eólica, assim como solar, este fator é de 0,2955 tCO₂e por MWh de energia renovável injetado na rede.

Com base no preço designado de um crédito de carbono de 3,88 dólares, é possível calcular que aproximadamente \$1,15 dólares são atribuídos para cada MWh de energia gerada. Esse incremento financeiro é relevante para os empreendimentos eólicos, pois agrega valor à energia produzida, incentivando a expansão de projetos renováveis e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

4.1 Co-benefícios e valorização dos créditos de carbono.

Os co-benefícios dos projetos de carbono são essenciais para a valorização e eficácia dessas iniciativas, ampliando seus impactos além da simples redução de emissões de gases de efeito estufa. Eles desempenham um papel crucial na materialização, quantificação e reconhecimento dos benefícios sociais e ambientais que acompanham os projetos de carbono.

Ao materializar esses benefícios, os projetos de carbono demonstram de forma tangível como as comunidades locais e o meio ambiente se beneficiam diretamente das iniciativas de energia renovável. Isso inclui melhorias na qualidade do ar, promoção da saúde pública, criação de empregos e desenvolvimento comunitário. A demonstração desses benefícios junto ao projeto de carbono torna os ganhos mais visíveis e compreensíveis para todas as partes interessadas, como investidores, comunidades locais e órgãos reguladores.

Um aspecto destacado dos co-benefícios é a capacidade de agregar valor aos projetos de carbono, permitindo que os créditos de carbono provenientes desses projetos sejam comercializados a preços superiores. Isso reflete a maior atratividade e o reconhecimento do impacto positivo abrangente dessas iniciativas, incentivando a adoção e expansão de projetos sustentáveis.

Conforme a figura 7 é observado um sobrepreço médio para projetos com co-benefícios de 62,69% em 2022 e de 37,23% em 2023:

	2022			2023		
	Volume (MtCO ₂ e)	Value (USD)	Price (USD)	Volume (MtCO ₂ e)	Value (USD)	Price (USD)
Total VCM	253.8	\$1.9 B	\$7.37	110.8	\$723.5 M	\$6.53
Has Co-Benefits	56.4	\$593.5 M	\$10.51	31.1	\$252.2 M	\$8.11
No Co-Benefits	197.4	\$1.3 B	\$6.46	79.7	\$471.5 M	\$5.91

Figura 11. Transações créditos de carbono comparativo a co-benefícios (Fonte: Ecosystem Marketplace - 2024 SOVCM)

Além da possibilidade de agregar valor aos projetos de carbono, os co-benefícios são requisitos fundamentais para os projetos que buscam elegibilidade para compensar as emissões da aviação civil internacional através do programa CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*). Este programa exige que os projetos atendam a pelo menos três Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Nações Unidas, entre outros critérios. A expectativa é que as companhias aéreas

exercçam uma grande demanda por créditos elegíveis ao programa, promovendo um aumento nos preços dos créditos de carbono.

Os projetos de carbono para empreendimentos eólicos representam atualmente uma grande oportunidade para remunerar melhor o MWh gerado, mesmo em um cenário conservador e sem valor agregado ao crédito. No entanto, existe uma possibilidade de aumentar o valor pago pelos créditos de carbono através da incorporação de co-benefícios e da participação em programas de descarbonização como o CORSIA.

Dessa forma, os co-benefícios não apenas ampliam os impactos positivos dos projetos de carbono, mas também fortalecem a atratividade econômica dessas iniciativas. Eles asseguram que os projetos não apenas contribuam para a mitigação das mudanças climáticas, mas também promovam o desenvolvimento sustentável, atendendo a uma série de necessidades sociais e ambientais. Com a crescente demanda e os requisitos rigorosos de programas como o CORSIA, a valorização dos créditos de carbono tende a aumentar, incentivando ainda mais investimentos em projetos de energia renovável e sustentável.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo proporcionou uma análise profunda do papel dos créditos de carbono nos empreendimentos de energia eólica, destacando seus benefícios tanto financeiros quanto climáticos. Foi observado que os projetos de carbono não apenas oferecem uma remuneração adicional aos empreendimentos, mas também desempenham um papel essencial na captura, quantificação e materialização dos benefícios climáticos, sociais e ambientais.

Os créditos de carbono para empreendimentos de energia renovável já possuem um mercado estabelecido, capaz de proporcionar uma remuneração extra significativa por MWh gerado, reflexo do mercado voluntário de carbono internacional. No entanto, foi identificadas oportunidades para aumentar ainda mais o valor atribuído a esses créditos de carbono. Uma estratégia promissora é incorporar co-benefícios aos projetos de carbono de empreendimentos de energia renovável. Isso não apenas fortalece a atratividade econômica dos projetos e das comunidades envolvidas, mas também alinharia os esforços com objetivos de sustentabilidade mais amplos, agregando maior valor aos créditos de carbono.

A participação em programas de descarbonização, como o CORSIA, pode abrir um novo ambiente de mercados e aumentar a demanda por créditos de carbono certificados neste segmento regulado. Ao explorar essas oportunidades e maximizar o valor dos créditos de carbono, é possível promover a transição para uma economia de baixo carbono assim como também assegurar benefícios sustentáveis de longo prazo para as comunidades locais e o meio ambiente. Este estudo oferece uma base sólida para futuras pesquisas e práticas que visem otimizar o potencial dos projetos de energia eólica no contexto do mercado global de créditos de carbono.

REFERÊNCIAS

INSURANCE INFORMATION INSTITUTE - World Weather-Related Natural Catastrophes By Perfil, 1980-2018. Disponível em: <<https://www.iii.org/graph-archive/218092>>. Acesso em: 08 julho 2024.

HAMERKOP - The Ever-Expanding World of Carbon Certification Standards. Disponível em: <<https://www.hamerkop.co/blog/the-ever-expanding-world-of-carbon-certification-standards>>. Acesso em: 08 julho 2024.

ANEEL – Sistema de Informações de Geração da ANEEL – Capacidade de Geração do Brasil. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllWjIYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwi dCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 31 maio 2024.

GOLD STANDARD – Impact Registry. Disponível em: <<https://registry.goldstandard.org/projects?q=&page=1>>. Acesso em: 08 julho 2024.

UNFCCC – Introduction to Climate Action. Disponível em: <<https://unfccc.int/climate-action/introduction-climate-action>>. Acesso em: 08 julho 2024.

GLOBAL CARBON COUNCIL – Projects Requesting Registration. Disponível em: <https://projects.globalcarboncouncil.com/pages/requesting_registration_projects>. Acesso em: 08 julho 2024.

CDM – Clean Development Mechanism - Registered Projects. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>>. Acesso em: 08 julho 2024.

VERRA – Verified Carbon Standard (VCS) - Disponível em: <<https://registry.verra.org/app/search/VCS>>. Acesso em: 08 julho 2024.

AMERICAN CARBON REGISTRY (ACR) – Registered Projects. Disponível em: <<https://acr2.apx.com/myModule/rpt/myrpt.asp?r=111>>. Acesso em: 08 julho 2024.

CDM – Methodological Tools. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/Reference/tools/index.html>>. Acesso em: 08 julho 2024.

CDM – Sustainable Development co-Benefits Tool. Disponível em: <<https://www4.unfccc.int/sites/sdcmicrosite/Pages/SD-Tool.aspx>>. Acesso em: 08 julho 2024.

QUANTUM COMMODITY INTELLIGENCE – Quantum Data, Voluntary Carbon Market (VCM). Disponível em: <<https://www.qcintel.com/carbon/data/>>. Acesso em: 31 maio 2024.

ECOSYSTEM MARKET PLACE – State of the Voluntary Carbon Market (SOVCM). Disponível em: <<https://www.ecosystemmarketplace.com/publications/2024-state-of-the-voluntary-carbon-markets-sovcm/>>. Acesso em: 08 julho 2024.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – Método da análise de despacho. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/clima/paginas/metodo-da-analise-de-despacho>>. Acesso em: 08 julho 2024.

Análise do atendimento aos requisitos operativos de fator de potência em usinas associadas de geração eólica e solar.

Pedro H. Roesler¹, Guilherme B. de Andrade¹, Wendy C. Santo¹, Pedro A. B. Block¹, Arthur F. Bonelli¹.

1.MAB ENGENHARIA

pedro.roesler@mab-engenharia.com, guilherme.andrade@mab-engenharia.com, wendy.santo@mab-engenharia.com, pedro.block@mab-engenharia.com, arthur.bonelli@mab-engenharia.com

RESUMO

O presente trabalho aborda o atendimento aos requisitos técnicos de fator de potência por usinas híbridas e associadas, que combinam diferentes tecnologias de geração conforme definição da ANEEL. Estas usinas oferecem benefícios significativos tanto para o sistema elétrico quanto para os geradores, incluindo maior eficiência na utilização do sistema de transmissão, redução de ociosidade e incentivo à geração de energias limpas e renováveis. A operação conjunta dessas fontes apresenta novos desafios técnicos devido às suas diferentes capacidades de controle e injeção de reativos. A partir de um estudo de caso real de um complexo eólico com a inclusão de um projeto solar associado, foi realizada uma análise da complementariedade das fontes ao longo do ano e a capacidade de cada tecnologia em atender aos requisitos de fator de potência. Os resultados das simulações demonstraram que a inclusão da geração solar trouxe benefícios significativos em termos de compensação reativa, eliminando a necessidade de equipamentos adicionais que seriam necessários no parque eólico original. Assim, o trabalho destaca a importância de avaliar diferentes cenários operacionais e a complementariedade das fontes de geração para atender eficientemente aos requisitos técnicos do ONS.

Palavras-chaves:

Energias renováveis; Usinas híbridas; Fator de potência.

ABSTRACT

This work addresses the compliance with power factor technical requirements by hybrid and associated plants, which combine different generation technologies as defined by ANEEL. These plants offer significant benefits for both the electrical system and generators, including increased efficiency in the use of the transmission system, reduced inactivity, and the promotion of clean and renewable energy generation. The joint operation of these sources presents new technical challenges due to their different control capabilities and reactive power injection. Based on a real case study of a wind complex with the inclusion of an associated solar project, an analysis of the complementarity of the sources throughout the

year and the ability of each technology to meet the power factor requirements was conducted. The simulation results demonstrated that the inclusion of solar generation brought significant benefits in terms of reactive compensation, eliminating the need for additional equipment that would be necessary for the original wind farm. Thus, the work highlights the importance of evaluating different operational scenarios and the complementarity of generation sources to efficiently meet the ONS technical requirements

Keywords:

Renewable energy; Hybrid plants; Power factor.

1. INTRODUÇÃO

A geração de energia eólica representa hoje cerca de 24 GW de potência instalada no Brasil, com previsão de atingir 30 GW ainda no ano de 2024, sendo o sexto maior mercado de geração de energia eólica onshore do mundo (GWEC, 2023). Esta fonte de geração vem crescendo de forma significativa no Brasil a mais de uma década devido aos ventos propícios para geração eólica, beneficiando a matriz energética nacional com mais uma fonte renovável significativa e com mercado consolidado. Apesar dos diversos benefícios das fontes de geração renovável eólica e solar, verifica-se uma grande concentração destas usinas em determinadas regiões específicas, o que traz consigo consideráveis desafios no tocante ao despacho desta potência, visto que em sua maioria tais usinas estão eletricamente distantes dos centros de carga.

O cenário acima exposto, com alta concentração de usinas de geração renovável em determinados pontos do sistema, com dificuldade de escoamento de potência para os centros de cargas, aliado a alta taxa de solicitação de conexão destas usinas, acarreta dificuldades na liberação do acesso de diversas usinas eólicas e fotovoltaicas ao SIN. Neste contexto, diferentes medidas vêm sendo tomadas, dentre a qual destaca-se o reforço do sistema de transmissão. Adicionalmente, uma configuração alternativa de usinas de geração renovável vem ganhando destaque no cenário nacional, são as usinas híbridas e associadas.

Usinas híbridas e associadas segundo a ANEEL (ANEEL, 2021) são instalações de produção de energia elétrica através da combinação de diferentes tecnologias de geração. A geração de energia elétrica através de usinas híbridas apresenta benefícios para o sistema elétrico e para o gerador. Através do aproveitamento da complementariedade das diferentes fontes de geração é possível gerar mais energia elétrica com menores investimentos no sistema de transmissão, reduzir a ociosidade dos sistemas de geração, fazendo com que o sistema de transmissão seja utilizado de forma mais eficiente e menos custosa. Ademais, o processo de hibridização também representa um incentivo a geração de energias limpas e renováveis. Para o gerador, as usinas híbridas também são muito vantajosas, pois permitem aumentar a geração de energia aproveitando boa parte da estrutura de transmissão de uso próprio, compartilhando a linha de transmissão, subestação, além do aproveitamento dos terrenos já existentes e a sinergia entre as equipes técnicas.

A diferença entre uma usina híbrida e associada está basicamente no número de outorgas e na forma de medição. Uma usina híbrida, segundo ANEEL (ANEEL, 2021), deve possuir uma única outorga e pode possuir um único sistema de medição ou um sistema de medição por tipo de geração. Já as usinas associadas são aquelas usinas que possuem duas outorgas distintas, uma para cada tipo de fonte de geração, e neste caso devem possuir sistemas de medição independentes. Um exemplo prático de usinas associadas é a associação de usinas de geração solar a parques eólicos já existentes. Outra vantagem da associação de usinas é que a associação pode ser realizada sem a necessidade de alteração do MUST (Montante de Uso do Sistema de Transmissão) contratado pela usina existente.

Como apresentado a geração de energia elétrica através de usinas híbridas e associadas traz consigo diversos benefícios tanto para o sistema elétrico quanto para o gerador de energia, porém a utilização de diferentes formas de geração de energia de forma conjunta apresenta novos desafios e paradigmas técnicos de projeto e operação destas usinas que devem ser avaliados. Neste sentido o presente trabalho aborda a questão do atendimento aos requisitos de fator de potência para usinas de geração eólica ou fotovoltaica pelo ONS no caso de usinas associadas de geração eólica e solar. Segundo o submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede do ONS (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2024) usinas eólicas e solares devem possuir capacidade de operar com fator de potência igual a 0,95 indutivo e capacitivo em seu ponto de conexão para diferentes situações de geração. Ao operar estas usinas de

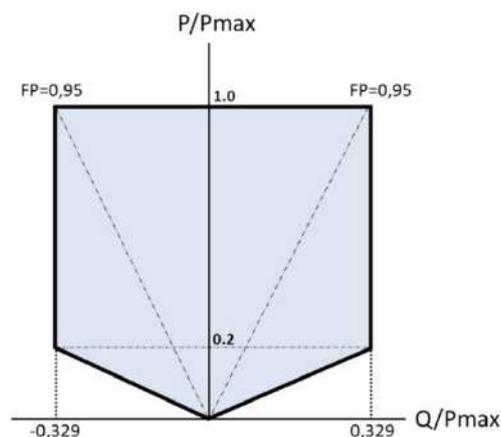
forma associada o fator de potência no ponto de conexão será impactado por ambas as fontes de geração, que possuem características de controle, capacidade de injeção de reativos (curva $P \times Q$) e funcionamento distintos. A complementariedade entre estas fontes e a contribuição de cada uma ao longo da geração prevista também deve ser avaliada.

Desta forma, o presente trabalho realizou um estudo de caso, no qual, a partir de um complexo eólico real é considerada a inserção de um projeto solar associado com dimensionamento baseado em características reais. Através da previsão de geração destes complexos é realizada uma análise da complementariedade entre as fontes, bem como o grau de participação de cada uma delas ao longo do ano. Com base nestes dados, e na capacidade de compensação reativa de cada tecnologia é discutida tanto a questão da capacidade de atendimento dos requisitos técnicos do ONS em termos do fator de potência considerando a nova fonte associada, bem como situações operativas com diferentes graus de participação de cada fonte e seu impacto no atendimento aos requisitos operativos do regulador.

2. NORMATIZAÇÃO VIGENTE PARA ANÁLISE DO FATOR DE POTÊNCIA EM COMPLEXOS EÓLICOS E SOLARES

O Submódulo 2.10 dos Procedimentos de Rede (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2023) estabelece os requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão. Dentre esses requisitos estão os relacionados com a capacidade de centrais geradoras em compensar uma certa quantidade de reativo para toda faixa de injeção de potência ativa PAC, conforme ilustrado na Figura 1.

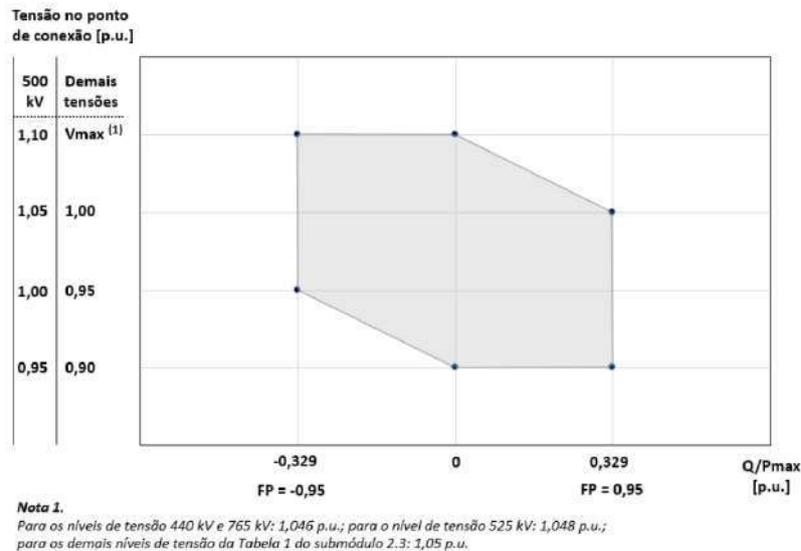
Figura 1 – Faixa de geração/absorção de potência reativa no ponto de conexão da central geradora.



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2023.

Como é possível observar na Figura 1, os inversores e os aerogeradores das centrais geradoras devem ter capacidade de zerar o fluxo de potência ativa e reativa no PAC em momentos de geração nula de potência ativa, e operar com um fator de potência (FP) capacitivo e indutivo de 0,95 no PAC em momentos de geração máxima. Todavia, o requisito operativo mencionado anteriormente é definido para tensão operativa nominal do PAC. Para as demais tensões operativas da barra de conexão da central geradora, o ONS estabelece requisitos específicos de atendimento ao FP, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Requisito para atendimento ao Fator de Potência na faixa operativa de tensão no ponto de conexão.



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2023.

Em um estudo de fator de potência convencional para atendimento dos requisitos do ONS, dois cenários principais devem ser atendidos:

1. Geração ativa nula com reativo no PAC também nulo: nesse caso o ponto crítico está no fato de que os aerogeradores/inversores devem conseguir compensar a característica capacitiva da rede interna a vazio, sendo comum a instalação de bancos de reatores;
2. Geração de potência ativa máxima operando com fator de potência 0,95 indutivo e capacitivo no PAC. Nesses cenários, é comum o uso de bancos de capacitores, visto que o parque operando com potência nominal terá uma característica indutiva; resultando na possível instalação de bancos para compensação de reativo.

Esses testes funcionam muito bem para uma única fonte energética no parque, visto que sua operação é independente. Mas, ao incluir-se uma segunda fonte de energia, por exemplo um parque eólico com uma usina solar associada, o primeiro teste se enquadra, visto que ainda pode ser possível operar com os dois parques sem geração de potência ativa; porém, nos outros dois cenários a potência máxima a ser considerada não podem ser a soma das potências nominais das fontes eólicas e solares e sim a potência máxima contratada pelo parque e um percentual de participação de cada fonte de geração, sendo necessário uma análise criteriosa do percentual de participação de cada fonte energética no estudo de fator de potência, visto que alguns modelos de inversores e aerogeradores possuem uma injeção de reativo capacitivo/indutivo limitada de acordo com a potência ativa, como é observado em aplicações comerciais.

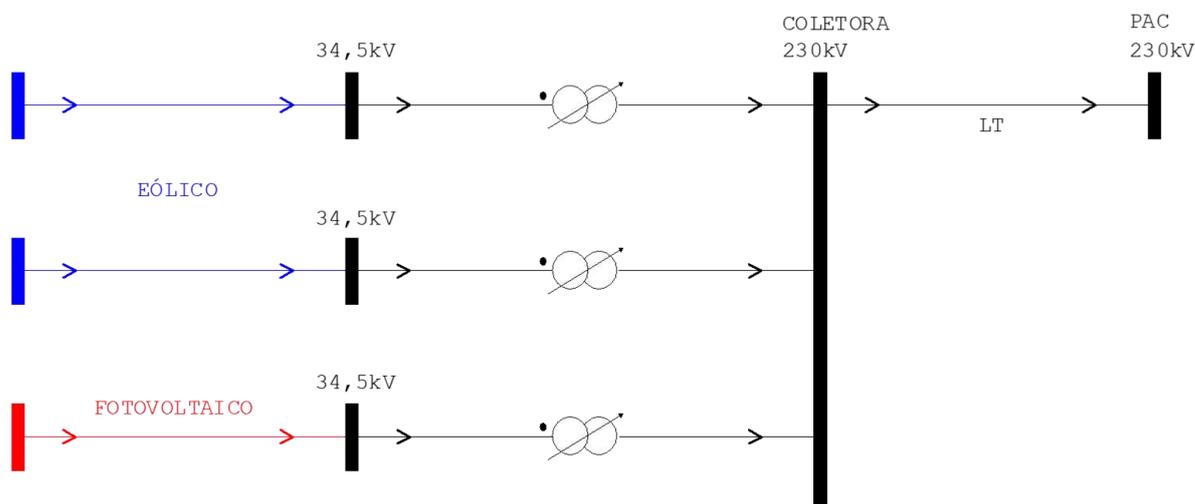
Além disso, ambos inversores utilizados nos painéis solares quanto aerogeradores possuem modos de operação com potência ativa nula, sendo estes o *Q at Night* e *WindFree*, respectivamente, de modo que os inversores solares podem ser capazes de, mesmo no período noturno, contribuir com a compensação de reativo dos parques eólicos, podendo eliminar a necessidade da instalação de ao menos um banco de capacitores, a depender da capacidade de geração do *Q at Night*, acarretando um cenário que pode ser mais vantajoso e lucrativo no médio e longo prazo, visto que um elemento passivo, banco de capacitores, pode ser substituído pela operação dos inversores a noite, que terão um custo de operação mas também agregarão à geração total do parque durante o dia. Devido a isso, vem se popularizando cada vez mais a utilização de usinas híbridas ou associadas, e pelos motivos supracitados faz-se necessário uma análise mais criteriosa do atendimento aos requisitos normativos destas usinas.

3. DESCRITIVO DO COMPLEXO AVALIADO

A fim de realizar os estudos de fator de potência em parques híbridos, um parque eólico com usina solar associada foi modelado, tendo como base dados de parques eólicos e solares reais; sendo a potência instalada de energia eólica 136,5 MW e solar 56,7 MW, aproximadamente 41% da eólica, detalhes no Quadro 1. Vale ressaltar que nesta modelagem está sendo considerado o parque eólico já existente, com MUST contratada de 136,5 MW, e o respectivo parque solar está sendo associado a usina eólica, porém sem alteração do MUST contratado, modalidade de contratação de usinas associadas muito comum atualmente no Brasil.

A Figura 4 apresenta a rede simplificada do parque, sendo representada pelo equivalente de cada circuito. As quantidades de aerogeradores e inversores instaladas por circuito está indicada no Quadro 2. com dois transformadores dedicados aos aerogeradores, circuitos em azul, e um aos inversores, circuito em vermelho. Todos os transformadores estão com o controle de tap ativado, podendo variar entre 0,85 e 1,175. As impedâncias equivalentes dos circuitos internos dos parques eólicos e solar, assim como dos transformadores de alta tensão e da linha de transmissão conectando a subestação coletora ao PAC estão descritos no Quadro 3 na base de 100 MVA.

Figura 4– Rede interna simplificada do parque híbrido modelada no ANAREDE.



Fonte: Autores.

O complexo eólico estudado, para atendimento aos requisitos de fator de potência e geração de potência reativa do ONS, possui 2 reatores de 5 MVAr cada e 2 bancos de capacitores de 6 MVAr instalados. A necessidade destes equipamentos após a conexão do complexo solar será avaliada nos estudos do presente trabalho.

Quadro 1 – Potência instalada de aerogeradores e inversores.

Potência nominal dos aerogeradores	2,1 MW
Potência nominal dos inversores	1,05 MW
Número de aerogeradores	65
Número de inversores	54
Potência total dos aerogeradores	136,5 MW
Potência total dos inversores	56,7 MW

Fonte: Autores.

Quadro 2 – Número de aerogeradores e inversores por circuito.

Número de aerogeradores no circuito equivalente 1	39
Número de aerogeradores no circuito equivalente 2	26
Número de inversores no circuito equivalente 3	54

Fonte: Autores.

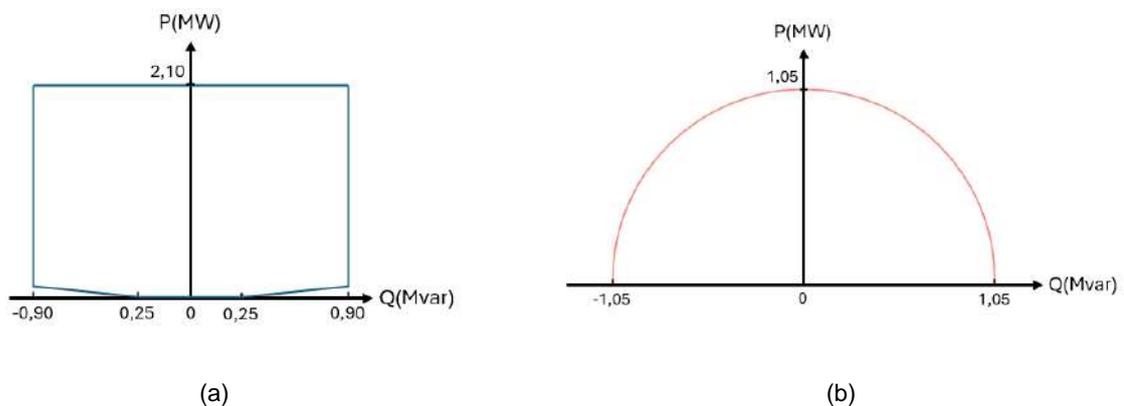
Quadro 3 – Impedâncias da Rede simplificada.

Componente	Impedância Equivalente		
	R (%)	X (%)	B (MVar)
Circuito Interno Eólico 1	0,55	12,51	3,97
Circuito Interno Eólico 2	1,09	19,19	4,30
Circuito Interno Solar	0,70	6,33	1,39
Transformador 1	0,26	13,26	-
Transformador 2	0,26	13,26	-
Transformador 3	0,26	13,26	-
Linha de transmissão	1,42	8,66	16,98

Fonte: Autores.

As curvas de capacidade dos aerogeradores e inversores utilizadas estão ilustradas nas Figuras 5 (a) e (b) respectivamente.

Figura 5 – Curvas de capacidade dos aerogeradores (a) e inversores (b).



Fonte: Autores.

Com relação à capacidade de compensação de reativo dos inversores durante o período noturno, considerou-se no estudo um valor igual a 30% da capacidade nominal do equipamento. Esse percentual foi arbitrado devido aos seguintes fatores: Reduzir perdas nos equipamentos da central geradora; aderir a valores aplicados em soluções comerciais; aumentar a vida útil dos inversores fotovoltaicos. A justificativa relacionada com as perdas foi embasada no trabalho de Vlahinić et al (2019), onde os autores fazem uma investigação das perdas nos equipamentos e cabeamentos utilizados em plantas fotovoltaicas. Já a justificativa referente ao valor estar de acordo com soluções comerciais foi motivado pela especificação técnica elaborada por SMA (2024), onde a fabricante do inversor determinou um valor máximo de potência a ser compensada nos instantes sem geração igual a 30% da potência nominal do equipamento, sendo essa funcionalidade de compensar reativo no período noturno chamada Q at night. Por fim, a justificativa referente a preservação da vida útil do equipamento foi embasada no estudo de Lavi e Apt (2022), onde os autores comparam o custo da compensação de reativo por inversores com o custo de compensação de reativo por compensadores síncronos. Nesse trabalho os autores levam em consideração nos cálculos de custo a degradação dos inversores em função do reativo compensado.

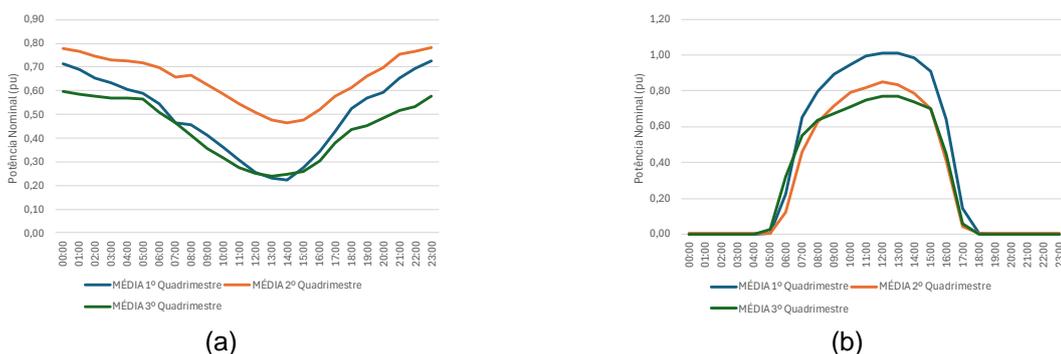
4. LEVANTAMENTO DO PERFIL DE GERAÇÃO E COMPLEMENTARIEDADE

Como mencionado anteriormente, a geração por painéis solares e por aerogeradores em conjunto é complementar, ou seja, não possuem os mesmos instantes de máxima geração. Dessa forma, a análise do fator de potência considerando a potência instalada ou o MUST da central geradora se torna muito conservadora, não refletindo o fator de potência em que a instalação irá operar na maior parte do tempo. Para contornar esse problema, é primordial avaliar os diferentes perfis médios de geração anual de cada uma das fontes de geração da usina híbrida.

Para determinar esses perfis utilizou-se a base de dados do ONS, disponível em ONS (2024). Essa base foi escolhida por reunir a geração média eólica e solar brasileira, por ser de fácil utilização e por ser uma base de dados aberta. Dentre os dados disponíveis nessa base, utilizou-se o perfil de geração médio de 2023 de duas barras com geração eólica e solar, sendo elas localizadas na mesma região.

Diante dos dados disponíveis, adotou-se como método de análise a divisão do período de 1 ano em 3 quadrimestres, calculando a média dos dados a cada 4 meses. Esse método permite aproximar uma curva que reflete o comportamento do perfil de geração dos parques ao longo do ano. Para tornar os dados comparáveis e aplicáveis a diferentes contextos, realizou-se a normalização dos dados em função da potência nominal de cada parque. Esse processo de normalização permite utilizar valores parametrizados, facilitando a aplicação desses resultados em projetos de outros parques situados na mesma região de estudo.

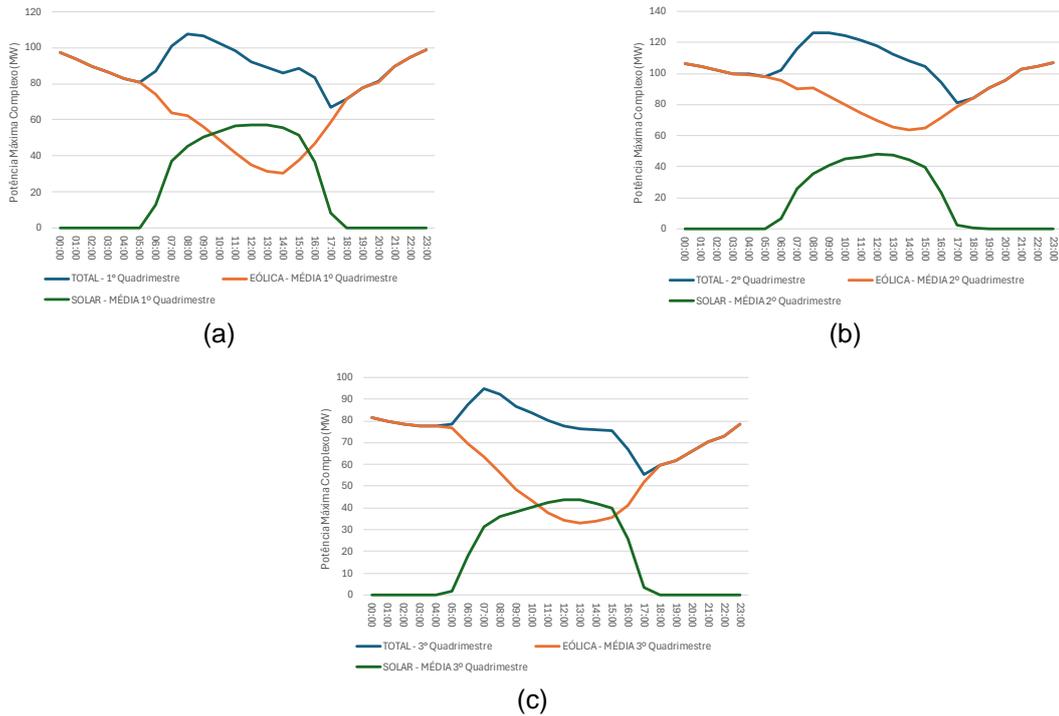
Figura 6 – Curvas de geração média das fontes eólicas (a) e solares (b) por quadrimestre no ano de 2023.



Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2024.

Partindo da premissa de que a potência máxima injetada pelo parque será igual à potência máxima disponível pela central geradora eólica (MUST contratado), foram adotadas para análise as potências nominais de 136,5 MW para o parque eólico e 56,7 MW para o complexo solar. De posse desses dados é possível combinar os gráficos de geração e visualizar a participação de cada fonte geradora no montante total de geração ao longo do dia, para cada quadrimestre analisado. Os gráficos desta análise são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Curvas de Geração combinadas 1ºQuadrimestre (a) 2ºQuadrimestre (b) e 3ºQuadrimestre (c) de 2023.



Fonte: o Autor, 2024.

Diante das limitações metodológicas para o estudo de caso, conforme citado em "Avaliação da Geração de Usinas Híbridas Eólico-Fotovoltaicas" (Empresa de Pesquisa Energética, 2017), este trabalho propõe a determinação de um coeficiente de participação CP para cada usina ao longo do dia. Este coeficiente de participação é calculado pela relação entre a geração horária de uma determinada fonte energética e o montante total de geração das duas fontes somadas, conforme a equação 1 e 2 à seguir:

$$Cp_{sol}(h) = \frac{P_{sol}}{P_{sol} + P_{eol}} \quad 1$$

$$Cp_{eol}(h) = \frac{P_{eol}}{P_{sol} + P_{eol}} \quad 2$$

Onde,

$Cp_{sol}(h)$ = Coeficiente de participação da central geradora solar no instante h em %

$Cp_{eol}(h)$ = Coeficiente de participação da central geradora eólica no instante h em %

P_{sol} = Potência da central geradora solar no instante h em MW

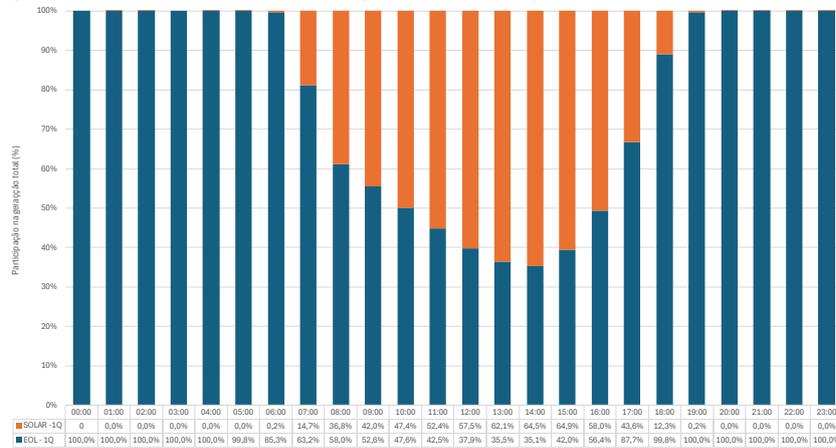
P_{eol} = Potência da central geradora eólica no instante h em MW

Destaca-se que o indicador proposto é calculado com base na média das potências ao longo de quatro meses, considerando também as médias nos respectivos intervalos horários. Este método, embora não represente a realidade em sua totalidade, proporciona uma resposta muito próxima do perfil real de geração e contribuição das duas diferentes fontes energéticas pelo motivo de que a análise foi fundamentada integralmente na sazonalidade observada ao longo do ano tanto para a geração solar

quanto para a geração eólica, sendo assim as centrais tendo suas variações horárias e anuais bem representadas no modelo.

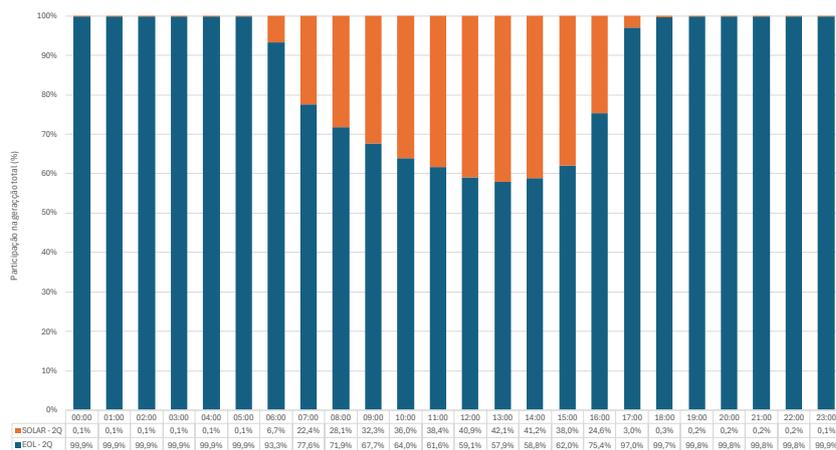
A partir das equações 1 e 2, foram plotados os gráficos que apresentam os coeficientes de participação correspondentes a cada horário ao longo do dia.

Figura 8 – Coeficiente de Participação das usinas geradoras no 1º Quadrimestre.



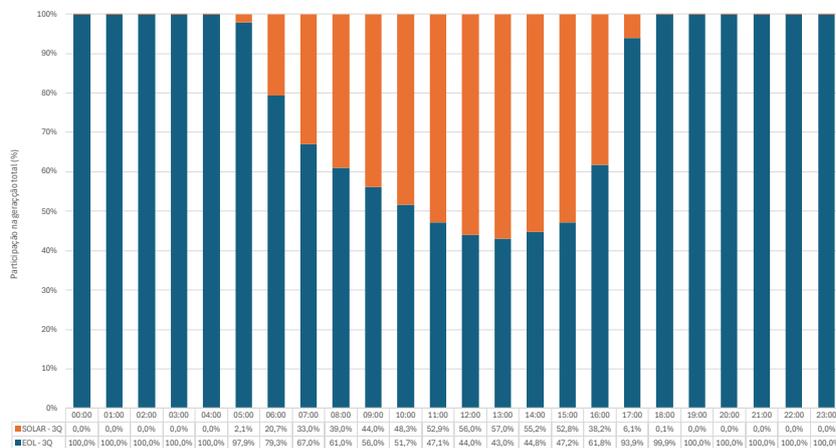
Fonte: o Autor, 2024

Figura 9 – Coeficiente de Participação das usinas geradoras no 2º Quadrimestre



Fonte: o Autor, 2024

Figura 10 – Coeficiente de Participação das usinas geradoras no 3º Quadrimestre.



Com base nos gráficos das Figura 8, Figura 9 e Figura 10, torna-se claro que a sazonalidade é o principal aspecto a ser considerado para realizar uma análise detalhada e realista da participação das fontes solares e eólicas ao longo do dia, especialmente no contexto de uma usina híbrida.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Tendo em vista a problemática apresentada no que tange a avaliação do fator de potência de usinas híbridas e associadas de acordo com o critério estabelecido pelo ONS considerando os diferentes cenários de geração das diferentes fontes que compõem a usina avaliada, 2 abordagens distintas são discutidas no presente trabalho. A primeira refere-se a avaliação do fator de potência em situações de geração de potência nominal máxima, ou seja, com a geração limitada pelo MUST contratado do referido complexo, sendo esse o cenário mais crítico em termos de fator de potência. E o segundo cenário refere-se a análise de diferentes condições operativas médias considerando a sazonalidade anual das diferentes fontes de geração. O segundo cenário é menos crítico em termos de fator de potência, porém apresenta as diferentes condições operativas que podem ser verificadas ao longo de um ano típico.

5.1 Análise geração de potência máxima

Para proporcionar uma adequada avaliação da capacidade do atendimento dos requisitos de fator de potência do ONS, além de considerar a potência máxima no PAC (MUST contratado), são considerados três cenários críticos de geração das fontes, sendo esses cenários chamados de Máximo noturno, Máximo diurno e Mínimo noturno.

- No cenário Máximo noturno é considerado os aerogeradores gerando a potência máxima (135,6 MW) e compensando reativo, conforme curva de capacidade, e os inversores gerando potência nula e compensando reativo limitado em 30% da potência nominal.
- No cenário Máximo diurno é considerado os inversores gerando potência nominal e, conseqüentemente, não compensando reativo. Já para os aerogeradores é considerado nesse cenário geração limitada igual a diferença entre a potência máxima e a potência nominal dos inversores, além de estarem compensando reativo conforme curva de capacidade.
- No cenário Mínimo diurno a geração dos inversores foi considerada igual a 0,60 pu na base do equipamento e a geração dos aerogeradores iguais a diferença entre a potência máxima e a potência gerada pelos inversores.

Importante esclarecer que a potência máxima da central geradora avaliada é igual a potência instalada de aerogeradores, pois foi considerado em um primeiro momento que a central geradora detinha apenas geração eólica, recebendo posteriormente a geração solar como complementar. Todas as análises realizadas consideraram tanto a geração eólica quanto a geração solar no complexo, menos as análises que explicitam a utilização de apenas uma das formas de geração.

Para ajudar na compreensão das considerações realizadas em cada cenário, a Tabela ilustra as gerações e os reativos máximos utilizados nos equivalentes para cada um dos cenários. Importante esclarecer que o reativo máximo que é aplicado em cada equivalente pode ser tanto indutivo quanto capacitivo.

Tabela 1 – Valores de potência ativa e reativa aplicados na análise dos requisitos de fator de potência do ONS.

Equivalente	Geração	Máximo noturno		Máximo diurno		Mínimo diurno	
		P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
1	Eólica	81,90	35,10	47,88	35,10	61,49	35,10
2	Eólica	54,60	23,40	31,92	23,40	40,99	23,40
3	Solar	0,00	17,01	56,70	0,00	34,02	45,36
Total		136,50	75,51	136,50	58,50	136,50	103,86

Fonte: Autores.

Realizando a simulação dos cenários foram obtidos os valores de potência ativa, potência reativa e fator de potência no PAC para todos os valores limites de tensão exigidos pelo ONS, sendo esses resultados ilustrados no Quadro 4. Nessas simulações os taps dos transformadores foram ajustados para que as tensões terminais ficassem com um valor mais próximo de 1,05 pu. Além disso, considerou-se uma redução da compensação indutiva máxima em alguns casos para que as tensões nas barras da rede ficassem acima de 0,90 pu.

Quadro 4 – Resultados dos cenários propostos para análise do atendimento dos requisitos de fator de potência pela central geradora híbrida avaliada.

Máximo noturno				
P_{PAC} (MW)	Q_{PAC} (Mvar)	FP	Tipo	V_{PAC} (pu)
132,6	58,4	0,92	Capacitivo	1,00
132,0	49,6	0,94	Capacitivo	0,90
131,5	-104,4	-0,78	Indutivo	1,05
131,5	-79,2	-0,86	Indutivo	0,95
Máximo diurno				
P_{PAC} (MW)	Q_{PAC} (Mvar)	FP	Tipo	V_{PAC} (pu)
133,0	51,5	0,93	Capacitivo	1,00
132,4	43,3	0,95	Capacitivo	0,90
132,7	-67,2	-0,89	Indutivo	1,05
131,6	-83,6	-0,84	Indutivo	0,95
Mínimo diurno				
P_{PAC} (MW)	Q_{PAC} (Mvar)	FP	Tipo	V_{PAC} (pu)
132,2	89,6	0,83	Capacitivo	1,00
131,6	80,7	0,85	Capacitivo	0,90
130,6	-134,1	-0,70	Indutivo	1,05
131,8	-76,6	-0,86	Indutivo	0,95

Fonte: Autores.

É possível afirmar por meio dos resultados apresentados no Quadro 4 que a central geradora híbrida consegue operar com valores de fator de potência entre -0,89 e 0,95 considerando as condições mais críticas. Ou seja, em termos dos requisitos de fator de potência estabelecidos pelo ONS, a central geradora avaliada tem capacidade de operar com fator de potência 0,95 indutivo e capacitivo em todas as condições operativas da planta.

Com relação ao requisito do ONS de fluxo de potência nulo no PAC, foi considerado uma compensação máxima por aerogerador igual a 0,25 Mvar, conforme curva de capacidade, e uma compensação máxima por inversor igual a 0,315 Mvar, sendo ela igual a 30% da potência nominal do inversor. Verificou-se que a central geradora analisada conseguiu compensar todo o capacitivo da rede interna, mantendo valores de fluxo de potência ativa e reativa no PAC iguais a zero.

Através dos resultados apresentados verifica-se uma melhora significativa em termos de atendimento dos requisitos do ONS com a associação da geração solar. Somente o parque eólico em operação era necessário a instalação de 2 reatores de 5 MVAR e 2 bancos de capacitores de 6 MVAR cada. Com a consideração do complexo solar em diferentes situações operativas, e considerando a limitação da potência ativa de acordo com o MUST contratado, não foi necessário a consideração de compensação reativa adicional.

5.2 Análise geração média anual

Por fim, na abordagem proposta para análise do fator de potência no PAC da central geradora considerando a operação média do empreendimento, avaliou-se dois cenários de gerações eólica e solar: Geração máxima noturna; Geração às 13h00. Esses cenários foram aplicados para todas as curvas médias quadrimestrais apresentadas no capítulo 4. Os instantes considerados nos cenários foram

escolhidos pois durante eles ocorrem uma alta penetração de uma das fontes na rede. Assim, o Quadro 5 apresenta os valores de geração considerados em cada cenário para cada um dos quadrimestres do ano de 2023. Os valores em pu apresentados nesse quadro estão na base da potência nominal do respectivo tipo de fonte.

Quadro 5 – Resultados dos cenários propostos para análise do fator de potência da central geradora híbrida.

	1° Quadrimestre		2° Quadrimestre		3° Quadrimestre	
Geração máxima noturna	Eólico	Solar	Eólico	Solar	Eólico	Solar
Participação na geração	100%	0%	100%	0%	100%	0%
Geração (pu)	0,72	0,00	0,78	0,00	0,60	0,00
Geração às 13h00	Eólico	Solar	Eólico	Solar	Eólico	Solar
Participação na geração	36%	64%	58%	42%	43%	57%
Geração (pu)	0,23	1,00	0,48	0,84	0,24	0,77

Fonte: Autores.

O Quadro 6 e o Quadro 7 ilustram, respectivamente, os resultados dos cenários Geração máxima noturna e Geração às 13h00 nos 3 quadrimestres. É possível observar nos quadros que o fator de potência no PAC, considerando a geração média da central, alcançou uma faixa de valores mais ampla em comparação com a faixa alcançada nos cenários de avaliação de atendimento dos requisitos do ONS. Para a máxima geração noturna média os resultados apresentados no Quadro mostram que a central geradora híbrida consegue operar com valores de fator de potência entre -0,84 e 0,85. Já para a geração média ocorrida às 13h00 os resultados apresentados no Quadro 7 mostram que a central geradora híbrida consegue operar com valores de fator de potência entre -0,87 e 0,82.

Quadro 6 – Resultados do cenário Geração máxima noturna.

1° Quadrimestre				
P_{PAC} (MW)	Q_{PAC} (Mvar)	FP	Tipo	V_{PAC} (pu)
95,7	75,0	0,79	Capacitivo	1,00
95,4	68,6	0,81	Capacitivo	0,90
95,4	-79,1	-0,77	Indutivo	1,05
95,3	-65,9	-0,82	Indutivo	0,95
2° Quadrimestre				
P_{PAC} (MW)	Q_{PAC} (Mvar)	FP	Tipo	V_{PAC} (pu)
103,7	72,1	0,82	Capacitivo	1,00
103,3	65,1	0,85	Capacitivo	0,90
103,2	-83,6	-0,78	Indutivo	1,05
103,2	-66,9	-0,84	Indutivo	0,95
3° Quadrimestre				
P_{PAC} (MW)	Q_{PAC} (Mvar)	FP	Tipo	V_{PAC} (pu)
79,8	80,5	0,70	Capacitivo	1,00
79,5	74,6	0,73	Capacitivo	0,90
79,7	-71,3	-0,75	Indutivo	1,05
79,6	-63,8	-0,78	Indutivo	0,95

Fonte: Autores.

Quadro 7 – Resultados do cenário Geração às 13h00.

1° Quadrimestre				
P_{PAC} (MW)	Q_{PAC} (Mvar)	FP	Tipo	V_{PAC} (pu)
86,1	65,8	0,79	Capacitivo	1,00
85,8	59,8	0,82	Capacitivo	0,90
86,2	-49,2	-0,87	Indutivo	1,05

85,7	-59,3	-0,82	Indutivo	0,95
2° Quadrimestre				
P_{PAC} (MW)	Q_{PAC} (Mvar)	FP	Tipo	V_{PAC} (pu)
109,9	87,0	0,78	Capacitivo	1,00
109,4	79,7	0,81	Capacitivo	0,90
109,5	-96,0	-0,75	Indutivo	1,05
109,7	-69,7	-0,84	Indutivo	0,95
3° Quadrimestre				
P_{PAC} (MW)	Q_{PAC} (Mvar)	FP	Tipo	V_{PAC} (pu)
73,9	100,1	0,59	Capacitivo	1,00
73,6	93,8	0,62	Capacitivo	0,90
73,9	-90,8	-0,63	Indutivo	1,05
74,4	-59,7	-0,78	Indutivo	0,95

Fonte: Autores.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho discute a questão do atendimento aos requisitos de fator de potência do ONS para complexos associados eólicos e solares. De acordo com o apresentado, a operação conjunta de diferentes fontes de geração de energia, apresenta novos desafios técnicos de projeto e operação destas usinas. Os requisitos técnicos de atendimento ao fator de potência requeridos pelo ONS consideram situações de injeção de potência nominal do complexo, porém em usinas híbridas e associadas a potência máxima do complexo usualmente estará limitada ao MUST contratado pelo complexo, bem como poderá ser atingida com diferentes percentuais de participação de cada fonte de geração. Considerando que as diferentes fontes de geração também possuem diferentes capacidades de compensação de potência reativa, a metodologia de avaliação utilizada pode impactar significativamente nos resultados e na necessidade ou não de compensação reativa adicional.

Neste contexto o presente trabalho apresenta a simulação de um complexo eólico real considerando a associação de um complexo solar, sem alteração do MUST contratado. Para definição dos cenários avaliados é apresentado um detalhamento do perfil de geração de cada fonte e da complementariedade entre elas. O levantamento do grau de participação de cada fonte embasa a definição dos cenários das simulações computacionais, que consideraram tanto cenários de geração de potência ativa máxima, com cenário noturno e cenários diurnos com baixa e alta participação da geração solar. Adicionalmente foram simulados cenários médios de operação anual considerando as sazonalidades de cada fonte de geração. Através dos resultados apresentados verifica-se primeiramente a importância da simulação de diferentes cenários e graus de participação das diferentes fontes de geração que compõem a usina, e que por fim a inserção da geração solar apresentou grandes benefícios em termos da compensação reativa adicional. O parque eólico originalmente avaliado possuía a necessidade de 4 equipamentos de compensação reativa adicional para atendimento aos requisitos do ONS, e nas simulações realizadas de acordo com a metodologia proposta no presente estudo, não é necessária a aplicação de nenhum equipamento de compensação reativa adicional.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Resolução Normativa ANEEL N°954, 30 de novembro de 2021.

GWEC (Global Wind Energy Council), Global Wind Report, 2023.

HASSAN, Q.; ALGBURI, S.; SAMEEN, A. et al. **A Review of Hybrid Renewable Energy Systems: Solar and Wind-Powered Solutions: Challenges, Opportunities and Policy Implications**. Elsevier, 2023.

LAVI, Y; APT, J. **Using PV inverters for voltage support at night can lower grid costs.** Energy Reports. Volume 8. 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Submódulo 2.10:** Requisitos Técnicos para a conexão às instalações de transmissão. Revisão 2023.10. 03/10/2023.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Geração Média Diária e Horária.** Disponível em: [Páginas - Geração Média Diária e Horária \(ons.org.br\)](#). Acesso em: 06/07/2024.

SMA. Q at Night - Reactive power outside feed-in operation with. Disponível em: <https://files.sma.de/downloads/Q-at-Night-TI-en-12.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2024.

VLAHINIC, S; et al. **Reactive Power Compensation with PV Inverters for System Loss Reduction.** Energies. 2019.

Development of a methodology for estimating offshore wind resources based on the integration of Artificial Intelligence Methods, Regional Atmospheric Physical Modeling and Remote Sensing.

Luiz Paulo de Freitas Assad¹, Alexandre Gonçalves Evsukoff², Fernando Alves Rochinha³, Alvaro Coutinho², Carina Stefoni Böck¹, Raquel Toste¹, Maurício Soares¹, Nilton Oliveira¹, Carlos Beisl¹, Douglas Nehme¹, Livia Sancho¹, Ana Luisa Souza Castanheira da Cruz¹, Adriano Vasconcelos¹, Patricia Mamede da Silva¹, Ricardo de Souza Alencar¹, Rian Costa Ferreira¹, Luiz Landau¹, João Gonzaga⁴

^{1, 2} Laboratório de Métodos Computacionais em Engenharia (LAMCE/COPPE/UFRJ); ³Engenharia Mecânica/COPPE/UFRJ, ⁴TotalEnergies

¹{lpaulo, bock, rtoste, soares, beisl, dnehme, sancho, alcruz, adriano, patmamed, ricardo, rferreira, landau}@lamce.coppe.ufrj.br; ²alexandre.evsukoff@coc.ufrj.br; ³faro@mecanica.coppe.ufrj.br, ⁴joao.gonzaga@totalenergies.com

RESUMO

A aquisição de dados meteorológicos in situ de forma sistemática e contínua no oceano, principalmente em regiões distantes do litoral, ainda é muito insignificante ao longo da costa brasileira. As medições existentes coletadas de sensores instalados em estruturas flutuantes não são suficientes para caracterizar temporal e espacialmente o recurso eólico offshore nessas regiões. Tais dificuldades estão associadas, em parte, às complexidades logísticas de instalação e manutenção de sensores em estruturas flutuantes e aos elevados custos financeiros envolvidos. Assim, é urgente a necessidade de desenvolver metodologias que possam minimizar a dependência da coleta de dados meteorológicos in situ para a determinação consistente do potencial eólico offshore. Nesse sentido, a utilização de modelos físicos computacionais que simulem a dinâmica atmosférica tridimensional sobre regiões oceânicas em escala espacial regional é uma poderosa fonte de informações para estudos deste tipo. A aplicação de técnicas de inteligência artificial (IA) permite a reconstrução de campos tridimensionais de variáveis meteorológicas como velocidade e direção do vento e a identificação de padrões atmosféricos. Tais técnicas consistem na construção de algoritmos que podem auxiliar tanto na construção de campos diagnósticos e prognósticos associado ao recurso eólico offshore (velocidade e direção do vento) e conseqüentemente na avaliação do potencial eólico offshore. O objetivo principal deste projeto de pesquisa a ser apresentado está associado ao desenvolvimento de uma metodologia computacional para estimar recursos eólicos offshore no tempo e no espaço com base em técnicas de sensoriamento remoto, modelagem física atmosférica e IA. Serão apresentados os objetivos principais, a metodologia a ser empregada e os resultados esperados. O projeto proposto reúne grupos associados à Área Interdisciplinar de Ciência e

Engenharia da Computação da COPPE/UFRJ com interesse na aplicação de Tecnologias Digitais à Engenharia Eólica.

Palavras-chaves:

Recurso eólico offshore; Sensoriamento Remoto; Modelagem Física Atmosférica; Inteligência Artificial; Metodologia

ABSTRACT

Acquiring in situ meteorological data systematically and continuously in the ocean, mainly in regions far from the coast, is still insignificant along the Brazilian coast. Existing measurements collected from sensors installed on floating structures are insufficient to characterize meteorological conditions temporally and spatially, such as those associated with the wind field (speed and direction) in these regions. Such difficulties are associated, in part, with the logistical complexities of installing and maintaining sensors on floating structures and the high financial costs involved. Thus, the need to develop methodologies that can minimize the dependence on in situ meteorological data collection for the consistent determination of offshore wind potential is urgent. In this sense, using physical computational models that simulate three-dimensional atmospheric dynamics over oceanic regions in regional detail is a powerful source of information for studies of this type. The application of artificial intelligence (AI) techniques allows the reconstruction of three-dimensional fields of meteorological variables such as wind speed and direction and the identification of atmospheric patterns. Such techniques consist of the construction of algorithms that can assist both in constructing diagnostic fields and wind forecasts (speed and direction) and, consequently, in assessing offshore wind potential. The proposed project brings together groups associated with the Interdisciplinary Area of Computational Science and Engineering at COPPE/UFRJ who are interested in applying Digital Technologies to Wind Engineering. This research project aims to develop a computational methodology to estimate offshore wind resources in time and space based on remote sensing techniques, atmospheric physical modeling, and AI. The main objectives, the methodology to be used, and the expected results will be presented. The proposed project brings together groups associated with the Interdisciplinary Area of Computer Science and Engineering at COPPE/UFRJ interested in applying Digital Technologies to Wind Engineering.

Keywords:

Offshore Wind Resource; Remote Sensing; Physical Modelling; Artificial Intelligence; Methodology

1. INTRODUCTION

In recent years, the Oil and Gas industry has sought to establish actions and goals to "decarbonize" its operations in the long term. Such definitions align with the perception that climate change will put increasing pressure on carbon-intensive economic sectors. Technological developments that combine the integration of wind and solar plants with offshore oil production structures represent an example of this type

of action. Thus, studies have intensified that seek to evaluate atmospheric renewable energy resources in oil exploration and production regions around the planet, especially those associated with more dominant generation technologies, such as solar and wind. Such studies seek to quantify the energy potential of the mentioned resources in space and over time to meet future projects' strategic and operational objectives. In this sense, it is urgent to intensify research efforts associated with acquiring meteorological data in oceanic regions and applying techniques involving regional atmospheric computational modeling. Such methods, applied in an integrated manner, are fundamental for the spatial and technical assessment of renewable wind resources at sea. With the increasing availability of satellite image banks and regional atmospheric physical numerical models implemented in different regions of the planet, artificial intelligence (AI) techniques can be used to develop statistical algorithms that allow for better spatial and temporal characterization of the wind and, consequently, better predictability of the offshore wind resource.

The main objective of this article is to present the developments carried out within the scope of an R&D project started in September 2023 that has as its main objective the development of a computational methodology to estimate offshore wind resources in time and space based on the integration of orbital remote sensing techniques, atmospheric physical modeling, in situ data analysis, and AI. The main objectives of the methodology to be developed and the expected results will be presented. The proposed project brings together groups associated with the Interdisciplinary Area of Computer Science and Engineering at COPPE/UFRJ interested in applying Digital Technologies to Wind Engineering. The project is financially supported by the company TotalEnergies and was initiated in September 2023.

2. METHODOLOGY

This section will briefly describe the methods for developing and implementing an algorithm based on AI techniques to estimate the wind resource at turbine heights based on remote data acquisition (SAR images), numerical atmospheric physical modeling, and in-situ data. Currently, two techniques are used to obtain offshore wind potential: computational modeling of atmospheric physics and meteorological data acquisition (in situ and remote). The main idea of the proposed methodology is to integrate both sources of information through the application of mathematical modeling based on AI techniques. Some studies have already concluded that this integration methodology achieves better results than only atmospheric numerical physical modeling (Montera *et al.*, 2021).

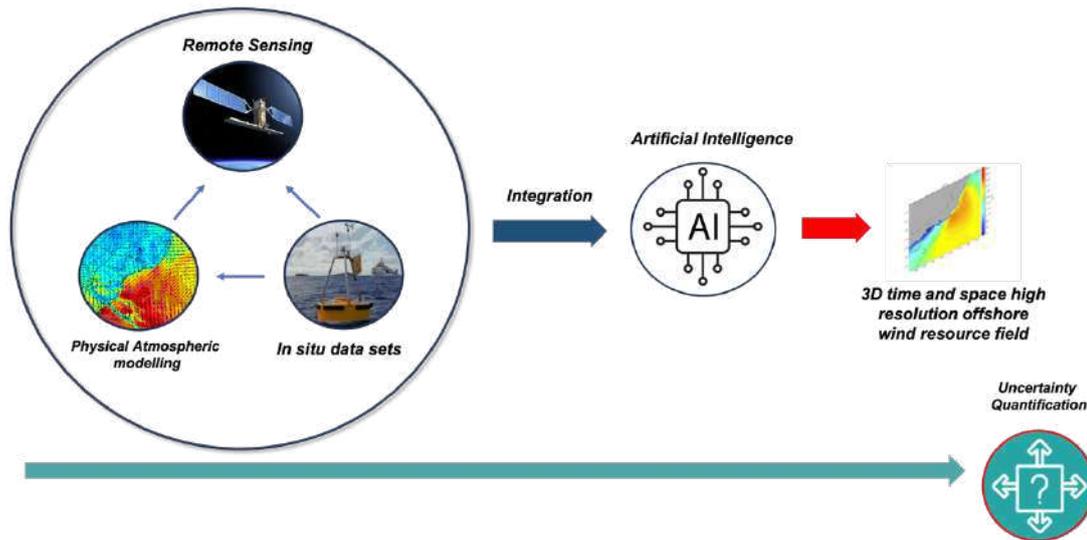


Figure 1: Summary of the methodology proposed in the project, which combines physical numerical modeling of the atmosphere, observed data, artificial intelligence, and uncertainty quantification.

3.1 In situ data acquisition

One of the main methods used to acquire in situ wind data in offshore regions is LIDAR (Light Detection and Ranging) sensors onboard floating structures. Floating structures with LIDAR sensors can measure wind speed and direction at various heights with high spatial (in the atmospheric column) resolution but are extremely expensive and spatially publicly scarce along the Brazilian coast and ocean regions. Furthermore, acquiring data consistently and continuously in ocean environments from floating structures like this represents an enormous technological and logistical challenge. Another type of equipment widely used for in situ wind field measurements is buoys with additional meteorological stations. Although such sensors are cheaper than the ones described previously, these devices only allow measurement of the wind field near the ocean surface and not at other levels of the atmospheric column. This project activity will include identifying, acquiring, processing, and analyzing meteorological data (when available) acquired in marine and coastal environments that can be used to understand the temporal dynamics of offshore wind resources in the project region of interest. Such data will be used to support the development of an algorithm to estimate the wind speed field derived from SAR images and to evaluate (validate) the numerical results obtained by a regional atmospheric physical model.

3.2 Remote sensing data acquisition (satellite)

Another technique used to estimate the wind field (speed) near the ocean surface is based on acquiring and processing images collected by sensors fixed on orbital platforms (satellites). This technique, based on the acquisition and processing of images from a sensor known as Synthetic Aperture Radar (SAR), is advantageous over in situ data acquisition methods, as it allows the assessment of the wind resource in an area over the ocean (Montera *et al.*, 2021). This technique can also be improved by acquiring in situ data that allows the calibration of the described method (Figure 2). Thus, an important observational

effort to assess the offshore wind resource is associated with acquiring remote data from C-band SAR images fixed to orbital platforms. Such images allow the extraction of the wind field in large areas while maintaining high spatial resolution, which optimizes and spatially extrapolates the observational effort with the potential to expand knowledge of the climatic behavior of the wind resource in an oceanic region. One of the developments to be carried out includes determining wind direction by integrating wind speed fields obtained with computational numerical simulation results with regional atmospheric physical models.

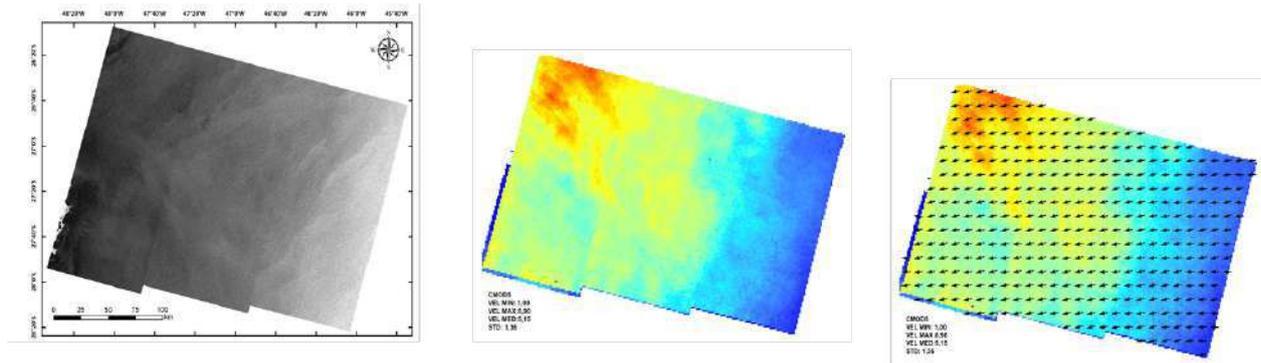


Figure 2: Synthetic Aperture Radar (SAR) image acquired by a sensor on board the Orbital Platform (left) and processed image with horizontal wind speed field distribution (center), and wind direction (right).

The project will employ Sentinel-1A and Sentinel-1B SAR imagery from the Sentinel Mission (ESA) to estimate wind resources near the sea surface. The acquired image set will be integrated with the wind fields obtained by atmospheric physical numerical modeling. Both data sets will be used to construct an AI algorithm. It is important to emphasize the development team's experience using the geophysical model function called CMOD5 (Rana and Adamo, 2022) to obtain the sea surface wind field from Sentinel SAR images for different regions along the Brazilian coast and near-ocean region. CMOD5 is a public domain model capable of recovering wind speed and direction. As explained in the previous section, the wind field estimated using SAR imagery is related to sea surface level, so it is essential to understand how we can extrapolate this information to turbine hub heights, generally between 70 and 140 m height. According to the wind turbine configuration (Tavares *et al.*, 2020), the variation in wind speed can be estimated using an equation called the logarithmic profile law. One of the objectives and innovations of this project will be the development of a methodology capable of estimating wind direction at other vertical levels by integrating results from three-dimensional numerical physical atmospheric models (explained in section 5.3) and the results obtained by the method explained in section 5.2.

3.3 Regional atmospheric physical modeling

In turn, numerical atmospheric physical models provide three-dimensional results of wind speed and direction over an entire area over the ocean. The consistent application of this method allows the coverage of spatial and temporal gaps in meteorological data that are quite common in oceanic regions. Another critical point to be emphasized is the possibility of generating numerical results precisely at the

vertical level of the turbine height (Tavares *et al.*, 2021). However, applying atmospheric numerical models tends to underestimate and smooth out spatial variability and propagate errors from various sources, reducing their accuracy. Such errors can be minimized by acquiring data (in situ and remote) that can be used to evaluate the numerical results generated or even integrated into the modeling process to guarantee the obtaining of prognostic fields consistent with the observed in situ data. Thus, the challenge of the proposed methodology is to estimate the offshore wind resource with spatial and temporal precision, which could positively impact the planning, operation, and maintenance of offshore wind farms along the Brazilian coast.

The physical model is the Weather Research and Forecasting (WRF) Numerical Weather Prediction model (Skamarock *et al.*, 2021). According to Skamarock *et al.* (2021), the WRF is a PNT model developed for both research and operational purposes by several institutions and government agencies in the United States. The model code is free and open, developed to be flexible, portable, and efficient in parallel computing environments. It is important to highlight that the WRF model has been used for different applications aimed at the wind energy sector, both onshore and offshore. In Brazil, its use can be highlighted for assessing offshore wind potential in the southeastern region of Brazil (de Assis Tavares *et al.*, 2021).

3.4 Algorithm for estimating offshore wind resources based on artificial intelligence

The methodology proposed for the project seeks to integrate with the application of machine learning techniques, remote sensing data (composed basically of SAR images), in situ data from meteorological buoys (surface measurements), and results from regional atmospheric physical computational models for generating diagnostics and forecasts of offshore wind resources at hub height on large offshore regions. To achieve this, different Deep Learning AI methods, such as Convolutional Neural Networks and Long-Term Memory Neural Networks, will be applied in an integrated manner. This methodology will allow us to obtain wind resource maps at turbine height. The proposed methodology integrates model results with different spatial resolutions and temporal scales, as shown in Figure 3. The information observed from SAR images is obtained with a resolution of 1 km and a time-frequency of 6 days (freely available). The wind speed field will be obtained from the SAR image at this time resolution/frequency. On the other hand, physical modeling allows the generation of the wind speed field at the same horizontal space resolution (1km or lower) and a frequency of up to 1 hour.

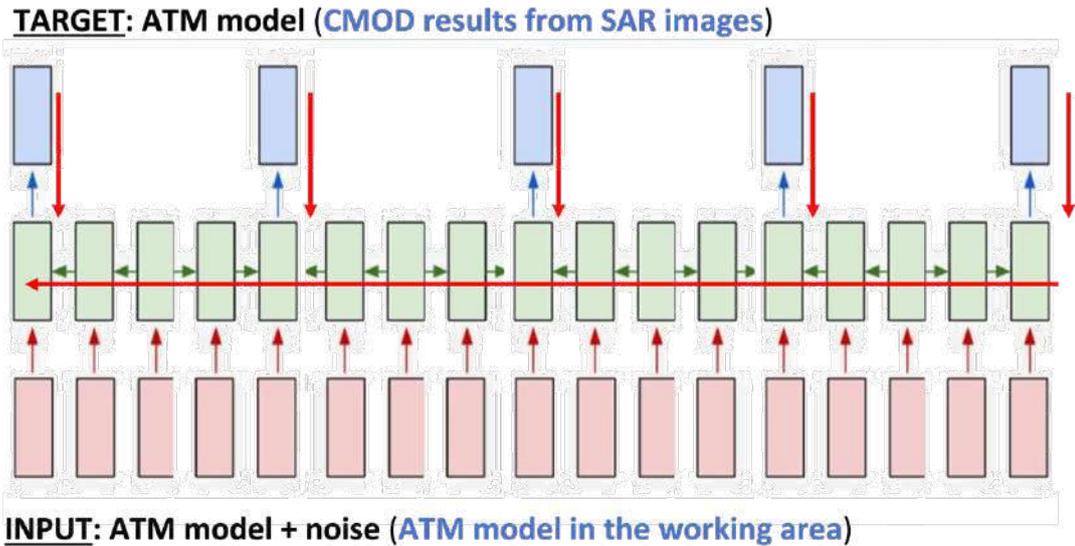


Figure 3: Schematic design with methodology to be used to integrate data of different natures to build an AI algorithm.

3.5 Quantifying uncertainties in model predictions

In previous sessions, the methodologies to be developed throughout the current project for fusing field data with physics-based models capable of estimating and predicting wind conditions (magnitude and speed direction) at the height of the turbines were detailed. This fact will be made possible by the intensive use of ML techniques, and, therefore, the resulting models belong to the emerging area known as Scientific Machine Learning (SciML), which takes advantage of the potential of computational simulation tools in real problems. A critical component to making these simulations reliable is the ability to estimate unavoidable uncertainties that affect models' predictive ability through different channels. Noise and sparse data are just some of the many sources of uncertainty that can be mentioned.

This project will use the rationale and methodology presented by (Psaros *et al.* 2021 and the references contained therein) as a reference framework. Two main approaches will be considered: Bayesian and model ensemble approaches. In general, in both approaches, the weights and biases of Neural Networks are characterized as random variables. Critical aspects involving computational costs and accuracy must guide effective methodologies. The activities developed here fall into two (sequential) branches: the design of routes to quantify the final uncertainty compatible with the proposed approaches to estimate wind conditions and prototypes to explore such routes.

4. Ongoing Developments and preliminary results

In this section, a brief description of the ongoing research activities and some preliminary results will be presented.

4.1 Analysis of in situ data sets: Definition of the study area

The in-situ wind data collected by meteoceanographic buoys played a decisive role in the execution of the project, as they were the ground truth to which the satellite data were compared and for the evaluation of physical atmospheric model results. Therefore, the availability of this information guided the definition of the area and analysis period for the entire project. In this sense, the National Buoy Program (PNBOIA) was chosen as the source of this information, as they collect wind data through fixed buoys for extended periods off the coast of the entire Brazilian coast and most of these collections are more than 1 km away from the continent, that is, outside the region of greatest contamination of synthetic aperture radar (SAR) images in the context of wind data extraction (Ahsbahs *et al.*, 2017).

However, some of the buoys in PNBOIA were not eligible for validation of information from the Sentinel-1 satellite, as the Brazilian coast only had images calibrated from 2016 to 2021. In this process of evaluating the wind data collected in situ, buoys that were active for less than one year were also excluded, as they do not represent a complete seasonal cycle, and those that were anchored in areas deeper than five hundred meters, as current technology makes it challenging to implement wind farms in these regions. Finally, priority was given to regions with the most intense winds and close to large Brazilian urban centers. It was concluded that the Itajaí buoy (Figure 4), between the dates of February 4, 2017, and November 16, 2018, met the best conditions to serve as a basis for validating satellite information, as there was the largest number of available satellite images, presented a large volume of valid wind data.

4.2 – Hydrodynamic Modelling

To improve the representation of the wind field simulated by the regional atmospheric model in the atmospheric boundary layer over the ocean, a regional physical oceanographic model (hydrodynamic model) that computationally simulates the sea surface temperature (SST) field with high spatial and temporal resolution was implemented. The sea surface temperature fields produced by this physical model were used as boundary conditions for experiments carried out with the WRF regional atmospheric physical model. The ocean numerical simulations were carried out with the widely used and reliable Regional Ocean Modeling System (Shchepetkin and McWilliams, 2005). A hindcast simulation was generated between February 7, 2017, and November 16, 2018, the interval coinciding between the periods of operation of the Itajaí buoy and the imaging of the SENTINEL-1 sensor.

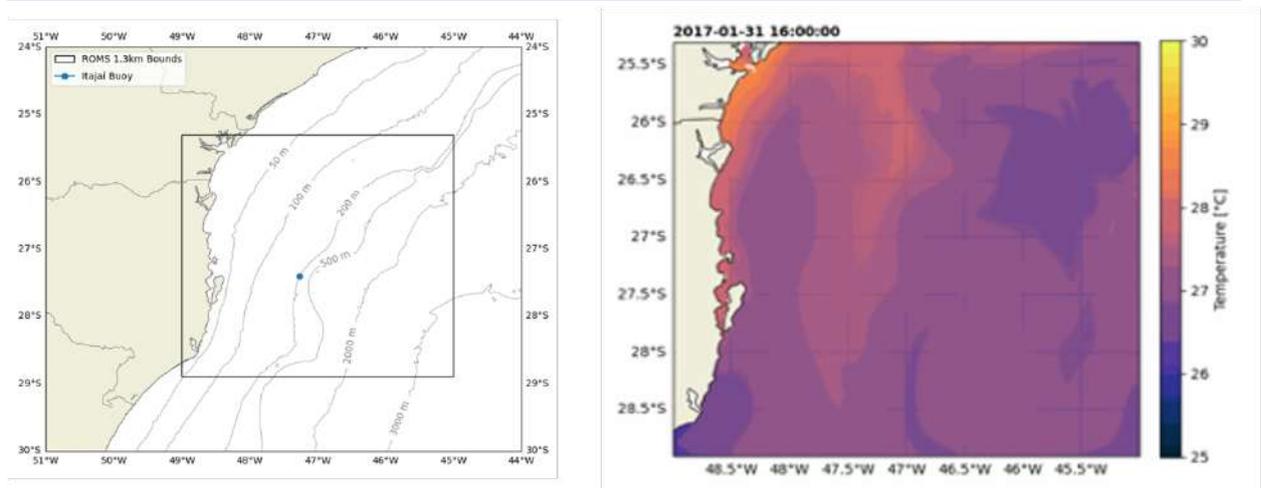


Figure 4 Domain of the hydrodynamic physical numerical model grid used in the simulations with the bathymetric lines of the region and the position of the Itajaí buoy (left). High space resolution sea surface temperature instantaneous field generated by the hydrodynamic regional model.

4.3 - Atmospheric regional computational modeling

The Final Analysis generated by the National Centers for Environmental Prediction is used as initial and atmospheric boundary conditions for the atmospheric simulations. FNL is generated using the Global Forecasting System model, with a grid resolution of 0.25° (~24 km) and a 6-hour time frame. This product is of higher quality than the usual GFS analysis as it includes more observations. The proposed numerical grids for the project consist of 3 domains with spatial decay of 3:1, with resolutions of 9, 3, and 1 km (Figure 5). For the atmospheric profile, the proposal is 45 levels to represent the atmosphere in all domains vertically.

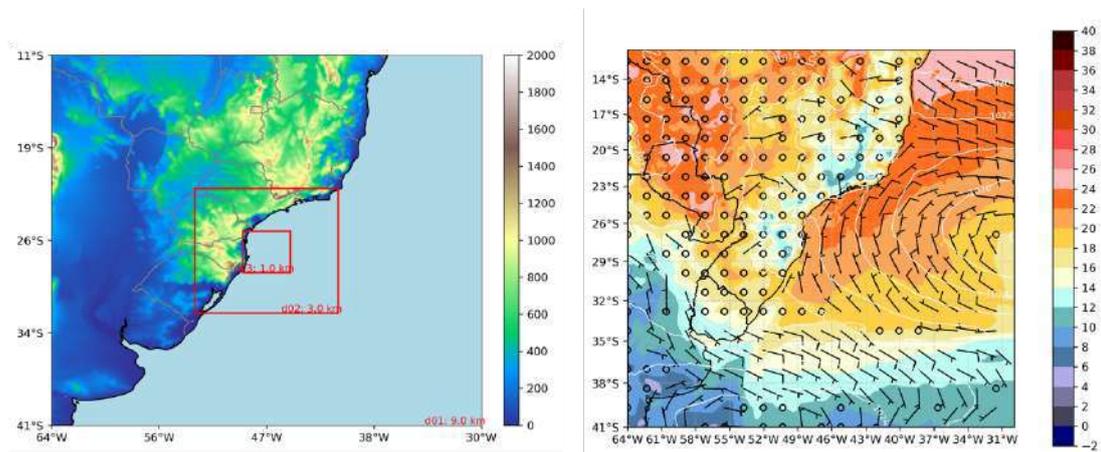


Figure 5. Modeling domain proposed in the WRF model configuration and its topographic distribution (left) and a snapshot of the 10-meter wind sea surface field already generated for the numerical coarse 9km grid (right).

4.4 - Developments in artificial intelligence

The choice of the methodological approach must be based on criteria that go beyond numerical performance. The workflow for adjusting the AI model is presented before. The SAR images will be used to calculate wind amplitudes in the study region. The numerical models will also be used to calculate a wind field forecast for the same region. The AI model will be adjusted to correct the numerical model's prediction so that it better fits the model calculated from the SAR images. As noted in Figure 3, SAR data is only available every 6 days, while the numerical model can be run to sample hourly, or every 3 hours. In this way, one of the objectives of the AI model is to complete the series of wind data for every day, obtaining values that are closest to the estimates made from the SAR data. This configuration imposes a series of restrictions on the development of the AI model, which must be considered when choosing the methodology. The process involves several types of uncertainty, as will be discussed in the next section.

The spatial-temporal prediction problem is grouped into the general video prediction problem, in which a sequence of images (frames) is provided to the model as input that produces a predicted next sequence of images as output. The approach to be used in this project is to start with the ConvLSTM model, which is relatively simpler and more robust than the others. The idea is to have a better understanding of the problem and be able to generate results quickly. The long short-term memory (LSTM) model was proposed by HOCHREITER and SCHMIDHUBER in 1997, as a way of making long sequence predictions. The topology of the LSTM layer allows the backpropagated gradient during model fitting to suffer from the zero-decay problem that normally prevents recurrent networks from learning long sequences. The LSTM model has also been applied to time series forecasting problems. SHI et. al adapted the topology of the LSTM model by replacing the multiplication operation between input and state vectors with the corresponding weight matrices through a convolution. In this way, each ConvLSTM unit processes an input image, producing an output image. In figure 6 is possible to observe some preliminary results associated with the application of a ConvLSTM algorithm for some physical model results.

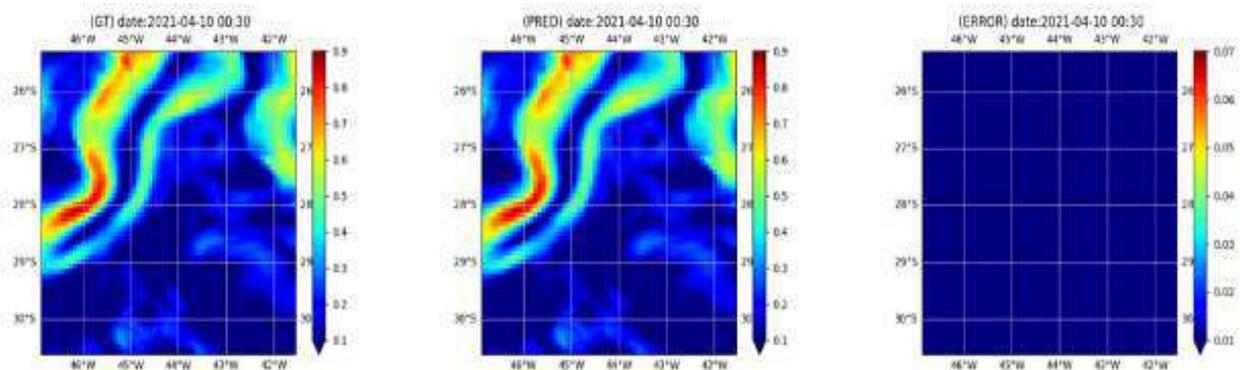


Figure 5. Sea surface wind field input data set (left), ConvLSTM sea surface wind predicted field and difference field (right)

4.5 Uncertainty Quantification

In this first phase of the project, regarding the topic of uncertainty quantification, the focus was on mapping (in a rigorous manner) the sources of uncertainty based on a comprehensive framework involving the components of the final model (data and models). Both random uncertainties (derived from data or models to be introduced in the process of constructing the final model and which cannot, in this context, be reduced, such as those arising from noise in the data) or epistemic (in which they weigh, above all, lack of information) were analyzed. data).

Total uncertainty can be, at least formally, decomposed from various sources (PSAROS et al., 2023). Therefore, among the various sources of uncertainty, it is necessary to place greater emphasis on those that are more critical since the process of quantifying uncertainty requires considerable computational effort. Here, it focuses on the identification of sources and propagation of uncertainties to develop propagation flows capable of leading to the objective of providing the estimation of wind potential. In this case, the uncertainties can be preliminarily characterized as parametric (associated with the model's parameters). Furthermore, model uncertainty comes into question. Given that the Machine Learning model will be developed throughout the project, we intend to use a prototype (involving the Lorenz equation, which is often used to describe the dynamics of climate systems) immediately so that uncertainty quantification techniques can be used immediately.

6. Future Work

The present paper described the ongoing developments related to a R&D project that has as main goal the development of a methodology to estimate the offshore wind resource field integrating artificial intelligence techniques, atmospheric physical modelling, remote sensing techniques and in situ meteorological data analysis. The proposed methodology has as main proposal not only to characterize but also to forecast the offshore tridimensional wind resource field. The paper also presents the ongoing developments and some of the preliminary results related to the project described.

7. Final Considerations

The authors would like to acknowledge TotalEnergies and National Agency of Oil, Gas and Biofuels - ANP for the general management of the project, the financial support and contributions to the research reported in this paper.

7. References

Ahsbahs, T.; Badger, M.; Karagali, I.; Larsén, X. G. 2017, Validation of Sentinel-1A SAR Coastal Wind Speeds Against Scanning LiDAR. *Remote Sensing*, 9, 552. <https://doi.org/10.3390/rs9060552>

Hochreitner, S; Schmidhuber, J. (1997) Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, v. 9, n. 8, p. 1735-1780.

Montera, L, Berger, H, Husson, R, Appelghem, P, Guerlou, L, and Fragoso, M. High-resolution offshore wind resource assessment at turbine hub height with Sentinel-1 SAR data and machine learning, *Wind Energ. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/wes-2021-35>, in review, 2021.

Psaros, AF, Meng, X, Zou, Z, Guo, L, Karniadakis, GE. Uncertainty Quantification in Scientific Machine Learning: Methods, Metrics, and Comparisons. *arXiv:2201.07766*

Rana, F. M.; Adamo, M. (2022). Uncertainty Analysis in SAR Sea Surface Wind Speed Retrieval through C-Band Geophysical Model Functions Inversion. *Remote Sens.*, 14, 1685. <https://doi.org/10.3390/rs14071685>

Shchepektkin, A. F., McWilliams, J.C. The Regional Ocean Modeling System: A split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model, *Ocean Modelling*, 9, 347-404, 2005.

Skamarock, W. C. et al. A description of the advanced research WRF model version 4.3. Technical report, NCAR, 2021.

Tavares, LFA, Shadman, M, Assad, LPF, Silva, C, Landau, L, Estefen, SF. Assessment of The Offshore Wind Technical Potential for The Brazilian Southeast and South Regions. *Energy* (1): 117097, 2020.

Tavares, LFA, Shadman, M, Assad, LPF, Estefen, SF. Influence of The Wrf Model and Atmospheric Reanalysis On The Offshore Wind Resource Potential And Cost Estimation: A Case Study For Rio De Janeiro State. *Energy*, 122767, 2021

ROTAS PARA IMPULSIONAR ESTRATÉGIAS DE DIVERSIDADE E INCLUSÃO DE GÊNERO NA INDÚSTRIA EÓLICA

Juliana de Almeida Yanaguizawa Lucena¹, Matheus Eurico Soares de Noronha², Felipe Vieira da Silva³, Letícia Jahn Souza⁴, Andressa Medeiros Santiso⁵

(1) Instituto Federal de Pernambuco – Campus Ipojuca; (2) Escola Superior de Propaganda e Marketing (ESPM) – São Paulo; (3) FIA Business School – São Paulo; (4) Universidade de Santa Catarina (UDESC) – Santa Catarina; (5) Creation Research Group (UFRN).

julianaalmeida@ipojuca.ifpe.edu.br; math.eurico.soares.noronha@gmail.com; felipe@abeeolica.org.br; leticiajahn2019@gmail.com, andressa.Santiso.014@ufrn.edu.br

RESUMO

A Diversidade e Inclusão (D&I) de Gênero tem sido um desafio para o setor de energia renovável. Existem uma série de desafios e algumas práticas em curso, porém o distanciamento entre essas práticas e iniciativas e a cultura das organizações ainda é um gargalo setorial. Nessa perspectiva, o objetivo deste trabalho é discutir as principais iniciativas para promoção de D&I na indústria de energia eólica, à luz do panorama existente na literatura. O artigo adotou uma metodologia ensaística, identificando iniciativas que foram levantadas por meio de coleta de dados com organizações do setor de energia eólica, revisão de literatura e experiência dos autores. A contribuição central o artigo concentrou-se em apresentar as principais práticas e iniciativas que podem ser adotadas para impulsionar as práticas setoriais de D&I na indústria de energia eólica.

Palavras-chaves: Diversidade; Gênero; Inclusão; Energia eólica; Equidade.

ABSTRACT

Gender Diversity and Inclusion (D&I) has been a challenge for the renewable energy sector. There are a series of challenges and some ongoing practices, however the distance between these practices and initiatives and the culture of organizations is still a sectoral bottleneck. From this perspective, the objective of this work is to discuss the main initiatives to promote D&I in the wind energy industry, considering the existing panorama in the literature. The article adopted an essayistic methodology, identifying initiatives that were raised through data collection with organizations in the wind energy sector, literature review and the authors' experience. The central contribution of the article focused on presenting the main practices and initiatives that can be adopted to boost sectoral D&I practices in the wind energy industry.

Keywords: Diversity; Gender; Inclusion; Wind energy; Equity.

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica desempenha um papel fundamental na busca por um futuro mais sustentável e na transição para fontes de energia limpa e renovável. A Diversidade e Inclusão (D&I) de gênero no setor de energia eólica é um tema de extrema relevância. Iniciativas nacionais e internacionais estão sendo criadas para acelerar as carreiras das mulheres na indústria eólica, apoiar o seu caminho para posições de liderança e promover uma rede global de orientação, partilha de conhecimento e capacitação. Embora tenha havido avanços, ainda existem desafios a serem superados para garantir uma participação mais equitativa das mulheres nesse campo.

De acordo com a Associação Internacional de Energia Renovável (IRENA, 2020a), as mulheres representam 33% dos profissionais que atuam em empresas de fontes renováveis, contrastando com apenas 21% no setor eólico (WWF, 2023). Apesar de algumas iniciativas existentes no mundo, estereótipos de gênero ainda persistem, dificultando o acesso igualitário (IRENA, 2020b). Normas culturais machistas, qualificação de funções predominantemente masculinas e a falta de políticas inclusivas são obstáculos identificados.

Especificamente na indústria eólica, a cada 1 MW de potência instalada globalmente são criados 15 empregos, mas apenas 21% dessa força de trabalho é composta por mulheres (IRENA, 2020a). A presença feminina é ainda mais reduzida em ambientes técnicos, como as áreas STEM (Ciências, Tecnologia, Engenharia e Matemática) (GWNENET, 2019).

Na busca por um ambiente mais sustentável e igualitário, a indústria eólica tem se empenhado em promover a D&I de gênero, alinhando-se aos critérios ESG. Instituições desse segmento defendem a necessidade de políticas e apoio governamental para impulsionar essa transição e incorporar os princípios ESG à cultura corporativa das organizações (IRENA, 2020a; 2020b).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar as principais iniciativas para a promoção da D&I na indústria de energia eólica. Para isso, os autores se basearam em dados coletados junto a organizações do setor, revisão de literatura e sua própria experiência. O estudo visa abordar os obstáculos enfrentados e propor estratégias para superar os desafios consolidados no caleidoscópio de desafios relacionados à igualdade de gênero e ao mapa de ações específicas para o setor eólico.

A pesquisa adotou técnica ensaística e foi conduzida por meio de consultas a artigos técnico-científicos, relatórios e base de dados junto a associações, organismos especializados e empresas do setor. A discussão sobre os obstáculos enfrentados pela indústria eólica para a promoção de D&I de gênero teve por base o caleidoscópio dos desafios (Figura 1) e o mapa de ações apresentados pelos autores em trabalho anterior (Figura 2) (Noronha et al., 2024).

2. DIVERSIDADE E INCLUSÃO DE GÊNERO NAS ORGANIZAÇÕES

Diversidade é um conceito amplamente vasto, e segundo a definição de Kreitz (2008) pode ser entendida como qualquer diferença significativa que distingue um indivíduo de outro. Para Nkomo e Cox (1999, p. 335), por diversidade pode-se compreender “um misto de pessoas com identidades grupais diferentes dentro do mesmo sistema social”. A relação entre diversidade de gênero e desempenho da empresa é complexa e existe uma vasta literatura empírica direcionando para inúmeras frentes de pesquisa (MENDES, 2016).

Por outro lado, a inclusão pode ser entendida como o grau em que um colaborador percebe que é um membro estimado do grupo de trabalho por meio da experiência de um tratamento que satisfaça suas necessidades de pertencimento e singularidade (SHORE et al., 2010). Segundo Garg e Sangwan (2021), o conceito de inclusão precisa ser examinado juntamente com a diversidade, para que possam ser respondidas questões importantes sobre o aproveitamento do potencial da força de trabalho diversificada.

A D&I de gênero nas organizações tem uma trajetória marcada por avanços e desafios no setor de energia renovável e especialmente na energia eólica (NORONHA et al., 2024). Segundo alguns autores (ARVIDSSON; DUMAY, 2022; ALLEN; LYONS; STEPHENS, 2019; NOLAND et al., 2016; ALI et al., 2015; KAKABADSE et al., 2015), os movimentos de mobilização feminista, especialmente nas décadas de 1960 e 1970, impulsionaram discussões sobre igualdade de direitos e oportunidades. Surgiram leis e políticas para combater a discriminação de gênero no ambiente de trabalho. A partir dos anos 2000, as empresas começaram a reconhecer a importância da diversidade e inclusão como estratégia de negócios (PERRYMAN et al., 2015; OPSTRUP; VILLADSEN, 2014; SINGH; VINNICOMBE, 2004). A busca por talentos diversos e a promoção de ambientes inclusivos tem se tornado latente nas organizações contemporâneas.

Para promover a D&I de gênero nas organizações, a adoção de práticas justas de contratação tem sido uma das principais preocupações do setor. Como parte da estratégia de inclusão de gênero da União Europeia, a disparidade salarial tem sido monitorada pelas organizações, com o objetivo de reduzir a discriminação no ambiente de trabalho por meio de medidas de transparência de pagamento (EUROPEAN COMMISSION, 2020).

Além disso, quando se trata de inclusão de gênero, há uma preocupação significativa com o impacto de práticas em mulheres em situação de vulnerabilidade. Essas mulheres são particularmente afetadas por conflitos econômicos e ambientais, devido a uma série de fatores sociais, econômicos e culturais, incluindo situações de pobreza (onde 70% das pessoas em situação de pobreza são mulheres) e responsabilidades domésticas (mulheres particularmente em áreas rurais assumem a maior responsabilidade pelo abastecimento doméstico de água e energia para cozinhar e aquecer, bem como pela segurança alimentar), dentre outros fatores (CHITIGA-MABUGU et al., 2023; OSMAN-ELASHA, 2012).

No setor de energia, a D&I de gênero foi relatada por alguns autores como significativa e longe de ser equilibrada, apesar das mulheres serem geralmente percebidas como tendo habilidades e conhecimentos valiosos (IRENA, 2021; 2020b; BARUAH, 2016; GWNENET, 2019). Mesmo que a presença de mulheres em cargos de liderança tenha aumentado gradualmente nos últimos anos, ainda há desigualdades salariais e sub-representação em setores como STEM (Ciências, Tecnologia, Engenharia e Matemática) (FALCÃO et al., 2019; PEARL-MARTINEZ; STEPHENS, 2016; FRAUNE, 2015). Atualmente, as organizações enfrentam o desafio de ir além da representatividade numérica e promover uma cultura inclusiva. Isso envolve eliminar vieses inconscientes, oferecer oportunidades iguais e valorizar a diversidade de perspectivas (CZAKO, 2020).

Nesta perspectiva, dentre os 17 Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS) estipulados em 2015 pela Organização das Nações Unidas, o presente trabalho se enquadra no contexto de apoio multilateral e entendimento transversal dos objetivos: (5) *Igualdade de Gênero*, (7) *Energia Limpa e Acessível*, (8) *Trabalho Decente e Crescimento Econômico*, (9) *Indústria, Inovação e Infraestrutura* e (10) *Redução das Desigualdades*. Esse enquadramento é fundamental para a promoção da D&I em múltiplas indústrias que possuem desafios ocultos e práticas que podem ser maximizadas para atender as agendas globais de desenvolvimento social e ambiental (IRENA, 2021; 2020b; GWNENET, 2019).

4. PRINCIPAIS INICIATIVAS SOBRE DIVERSIDADE E INCLUSÃO DE GÊNERO NA INDÚSTRIA EÓLICA

Para que as agendas globais dos ODS's e as organizações setoriais possam promover as iniciativas sobre D&I de forma transversal, segundo os autores Pearl-Martinez e Stephens (2016) e Fraune (2015), é fundamental que as iniciativas em curso sejam identificadas e maximizadas em escala científica e gerencial para alavancar melhores práticas de maneira multisetorial. Deste modo, as principais agências e instituições do setor energético promover iniciativas que podem colaborar com o avanço das pautas nas organizações.

Neste sentido, o presente artigo identificou que uma série de grupos de trabalho, associações e instituições ao redor do mundo têm se reunido para realizar iniciativas e estimular discussões práticas e políticas para inserção da mulher no mercado de energias renováveis. Algumas das principais iniciativas de D&I no setor eólico estão consolidadas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais iniciativas internacionais de promoção de D&I de gênero no setor de energias renováveis.

Iniciativa	Responsável	Objetivo principal
Entrepreneurial Woman in Renewable Energy	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP)	Iniciativa que visa fortalecer o papel das mulheres no setor de energias renováveis
Women in Wind	GWEC (Global Wind Organization)	Oferece um programa de mentoria, com turmas anuais de 20 pessoas. As mentoras são profissionais de referência do setor e as mentoradas devem ser atuantes ou oriundas de países emergentes em energia eólica.
Women in Green Hydrogen	ONG alemã	Rede de mulheres que trabalham no setor de hidrogênio verde. O programa oferece uma plataforma para conectar, capacitar e promover mudanças, além de mentoria.
Woman in Cleantech & Sustainability	Organização sem fins lucrativos composta por quase 3.000 profissionais (mulheres e homens) do setor.	É coordenado por várias organizações e entidades que trabalham juntas para fortalecer o papel das mulheres no setor de tecnologias limpas e sustentabilidade.
Movimento Mulheres 360 WEPs (ONU e Pacto Global)	Associação independente sem fins lucrativos formada por meio da união de mais de 100 empresas associadas e organizações protagonistas do cenário corporativo brasileiro	Seu compromisso é promover a equidade de gênero e ampliar a participação das mulheres no ambiente empresarial, na cadeia de valor e na comunidade
Programa de Integração de Gênero no Acesso à Energia	Centro de Energias Renováveis e Eficiência Energética da CEDEAO (Comissão da Comunidade Econômica dos Estados da África Ocidental)	Busca melhorar a igualdade de gênero no acesso à energia, liberando mulheres do trabalho doméstico e transmitindo mensagens de empoderamento por meio da mídia.
W20 (Women 20)	ONU (Organização das Nações Unidas)	O W20 é um dos grupos de trabalho do G20 formado por mulheres de diversas áreas de atuação do globo, como o setor acadêmico, de empreendedorismo e da sociedade como um todo. Visa apoiar países na abordagem da desigualdade de gênero e impulsionar o empoderamento das mulheres e meninas. Ele elabora recomendações para políticas públicas e contribui para um mundo mais justo e sustentável, com equidade de gênero.
Women of Offshore Wind	Organização australiana	Organização global dedicada a defender a diversidade de gênero e a inclusão na indústria eólica offshore e sua cadeia de suprimentos.

Fonte: os autores (2024).

As ações elencadas na Tabela 1 são alguns exemplos de organizações que realizam programas de mentoria para auxiliar mulheres na indústria de energia limpa a aprimorar suas carreiras, realizam o intercâmbio entre mulheres que trabalham ou desejam trabalhar nas indústrias de energias renováveis e tecnologias limpas, e constroem uma rede de profissionais para promover os papéis das mulheres no crescimento da economia verde e em causar um impacto positivo no meio ambiente.

Adicionalmente, no Brasil, observou-se iniciativas de algumas empresas de energia nos últimos cinco anos para estabelecer metas de D&I e incentivar uma maior presença feminina, seja em áreas técnicas, seja em cargos superiores na hierarquia corporativa. A Tabela 2 mostra algumas ações mapeadas no estudo de Noronha et al. (2024).

Tabela 2: Práticas e iniciativas de D&I de gênero na indústria eólica brasileira.

Iniciativa	Responsável	Objetivo principal
Operação de complexo eólico por mulheres.	AES Brasil	Aumentar a participação de mulheres na operação de seus parques eólicos.
Programa Hypatia	Instituto Ethos (Brasil)	Reconhece empresas que estão implementando políticas eficazes de diversidade, equidade e inclusão. Essa pesquisa é uma ferramenta importante para identificar áreas de melhoria e construir um ambiente de trabalho mais justo e igualitário.
EmpodereC	FGV Energia; ENERGYC; Sim, Elas Existem	Fortalecer a presença e o desenvolvimento de mulheres no setor de energia. Por meio de mentoria, o programa busca capacitar e apoiar mulheres que estão entrando, migrando ou ascendendo na área de energia.
Capacitação de mão de obra feminina.	Casa dos Ventos	Aumentar a capacitação profissional de mulheres nas comunidades locais aos empreendimentos eólicos.
Campanha global #Rebelsforchange	EDP e EDP Renováveis	Sensibilizar e promover maior participação de mulheres em carreiras de STEM
Capacitação de mão de obra feminina.	Elera	Aumentar a participação de mulheres na instalação de seus parques eólicos.
Capacitação de mão de obra. Distribuição de vagas administrativas entre homens e mulheres.	Engie Brasil	Aumentar a participação de mulheres na empresa, tanto em nível administrativo como em O&M de parques eólicos.
Programa "Mulheres na Eólica".	Instituto Federal de Pernambuco	Capacitação acelerada de mulheres para a indústria eólica.
Contratação de jovens aprendizes mulheres na fábrica de pás eólicas em Pernambuco.	LM Wind Power do Brasil	Aumentar a participação de mulheres no Programa Jovem Aprendiz da empresa.
Programa STEAM Girls (Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics)	GE Vernova e LM Wind Power do Brasil	Incentivar e inspirar meninas do ensino fundamental e médio a desenvolverem carreiras STEM.
Oficina "Ensino do futuro: práticas escolares em energia"	Vestas do Brasil	Estimular a inserção de conteúdos sobre energia eólica em escolas da rede pública
Programa "Keep it local"	Vestas do Brasil e EDP Renováveis	Impulsionar a empregabilidade nas zonas rurais onde os parques eólicos são instalados

Fonte: Os autores, adaptado de Noronha et al. (2024).

O mapeamento das iniciativas evidencia que a D&I de gênero na indústria eólica traz uma série de externalidades organizacionais significativas. Estudos demonstram que empresas com alta diversidade tanto de gênero como étnico-racial tendem a ter desempenhos mais eficazes em todos os níveis (MCKINSEY AND COMPANY, 2020). A diversidade de gênero, de origens e habilidades traz uma variedade de perspectivas e experiências que podem fomentar os alicerces para a inovação aberta nas organizações, permitindo-lhes melhores decisões e resultados. Isso enriquece a base de competências do setor, promovendo capacitação e criatividade. Times diversos tendem a tomar decisões mais informadas e equilibradas. A inclusão de diferentes vozes ajuda a evitar vieses e a considerar uma gama mais ampla de soluções (FRAUNE, 2015).

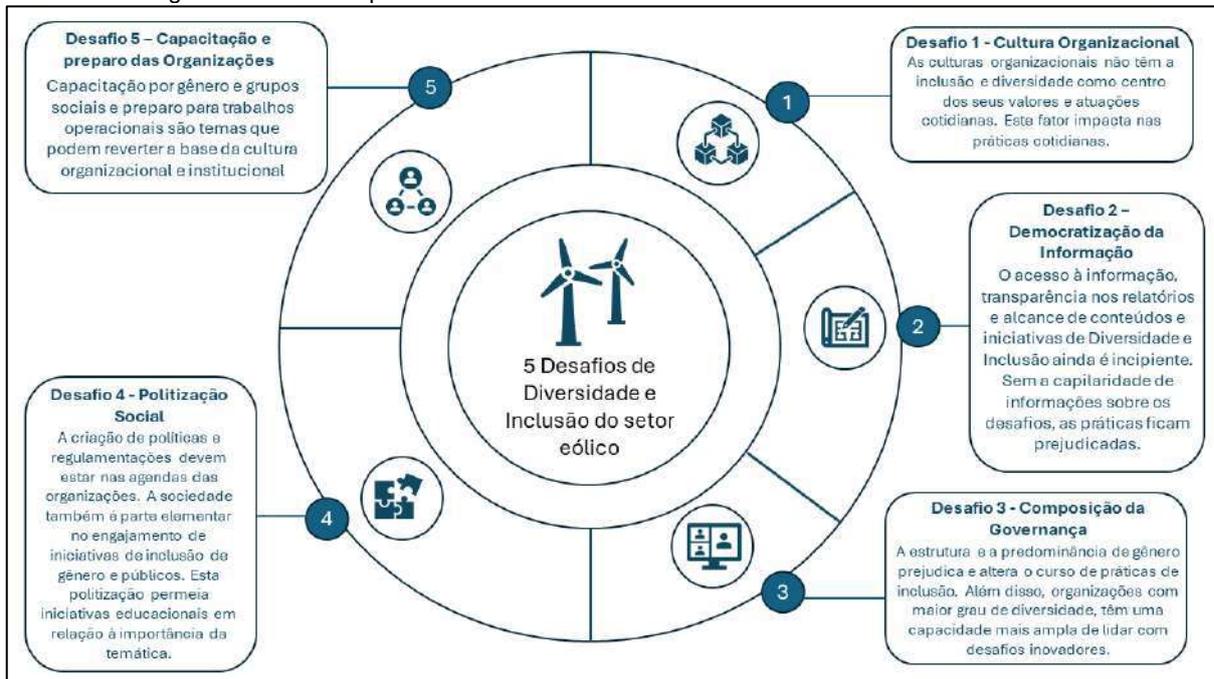
Empresas que promovem a diversidade são mais atraentes para profissionais talentosos. Isso resulta em uma força de trabalho mais qualificada e engajada. A inclusão de mulheres e minorias no setor de energias renováveis contribui para a equidade social e a igualdade de oportunidades. A diversidade também está ligada a melhores resultados ambientais e de saúde (PEARL-MARTINEZ; STEPHENS, 2016). A redução das emissões e a promoção de práticas sustentáveis beneficiam a sociedade como um todo (FALCÃO et al., 2019)

5. CALEIDOSCÓPIO DE DESAFIOS DE DIVERSIDADE E INCLUSÃO NO SETOR EÓLICO NACIONAL

Noronha et al. (2024), elaboraram um caleidoscópio de desafios (Figura 1) que perpassam desde a cultura organizacional até práticas de operação e manutenção nos parques eólicos, sendo possível destacar cinco desafios: (1) Cultura Organizacional; (2) Democratização da Informação; (3) Composição da Governança;

(4) Politização Social; e (5) Capacitação e Preparo das Organizações. Os desafios são apresentados abaixo.

Figura 1. Caleidoscópio de desafios de diversidade e inclusão no setor eólico nacional.



Fonte: Noronha et al. (2024).

- Desafio 1 - Cultura Organizacional:** apesar de iniciativas existentes para promoção de D&I na indústria de energia renovável e mais especificamente na eólica, conforme elencadas nas Tabelas 1 e 2, as culturas organizacionais ainda carecem de diretrizes claras para impulsionar uma maior diversidade de públicos e gênero nas organizações. A maior parte dos corpos executivos são dominados por homens brancos em posições executivas e de gerência. Além disso, a cultura das organizações, proveniente de definições de conselhos de administração ou corpo executivo mantém tradições que dificultam a possibilidade de uma agenda ESG com maior nitidez, evitando que as ações sejam disseminadas pelas organizações.
- Desafio 2 - Democratização da Informação:** os relatórios de sustentabilidade das organizações precisam ter uma abordagem mais concentrada na cultura da organização para que os diferentes níveis da empresa possam compreender os direitos e deveres que possuem para criar um ambiente com fácil acesso à informação. Os gestores devem promover iniciativas de comunicação integrada internamente e externamente às suas organizações, informando práticas e iniciativas de apoio a partir de redes e cursos que promovam educação, treinamento e oportunidades para mulheres dentro das organizações.
- Desafio 3 - Composição da Governança:** a composição dos conselhos administrativos e estruturas corporativas são majoritariamente dominadas por homens brancos com faixa etária acima de 35 anos. Essa predominância faz com que as iniciativas realizadas no âmbito corporativo não acompanhem as tomadas de decisão de forma homogênea. O desafio de ampliar a diversidade dos corpos executivos e governança das empresas deve ser nivelado por metas, da mesma forma que existem metas climáticas para atender critérios ESG, estruturando políticas e compliances corporativos para enfrentar a partir de novas lentes da inovação.
- Desafio 4 – Politização Social:** a participação cívica dos colaboradores e pessoas que estão envolvidos na organização deve ser incitada por programas e redes de apoio. Deste modo, a organização deve ter papel central para engajar os públicos no processo de compreender as diferenças e polarizações dentro da instituição, promovendo um ambiente e indústria que esteja preparada para enfrentar as desigualdades nos diferentes cargos de gerência das organizações.

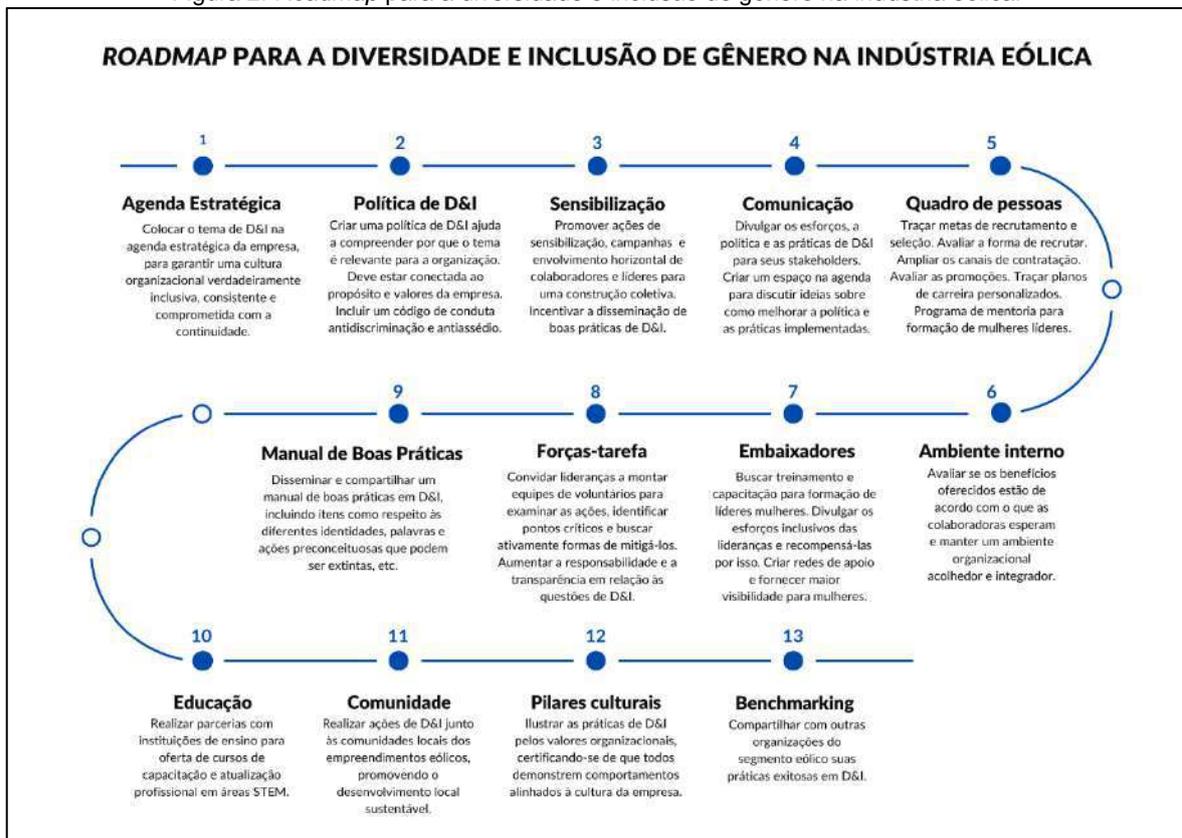
O desafio de politização envolve a necessidade de combater a desigualdade que está em silêncio na organização e ocorre nas minúcias de gestão no cotidiano das empresas, implicando em um grau elevado de maturidade na aplicação e avaliação de critérios e ações ESG.

- **Desafio 5 - Capacitação e Preparo das Organizações:** a capacitação e o preparo das organizações para apoiar na disseminação e educação sobre a temática ainda é escassa nas organizações. É necessário promover educação, treinamento, sororidade e oportunidades para as mulheres nas organizações, visando ampliar a realização de cursos e redes de apoio no combate ao preconceito. O desafio de capacitação está associado a reduzir as diferenças nos processos de politização social e compreensão da causa. A capacitação também deve ser observada como um mecanismo para educação básica e preliminar, incentivando crianças a aprofundarem no entendimento da importância de ambientes mais inclusivos e diversificados.

6. MAPA DE AÇÕES PARA PROMOÇÃO DE DIVERSIDADE E INCLUSÃO DE GÊNERO NA INDÚSTRIA EÓLICA

Ademais, as práticas voltadas à D&I de gênero e mapeadas na pesquisa de Noronha et al. (2024) se desdobraram na criação de um guia para apoiar a implementação de ações de D&I de gênero na indústria eólica, que estão consolidadas no *roadmap* da Figura 2. O *roadmap* proposto pelos autores sugere que as iniciativas em D&I vão além de um manual de boas práticas e uma política de diversidade transversal, que por si só são bastante eficientes, mas não suficientes, assim como outras ações pontuais focadas em datas comemorativas, eventos e números de contratação.

Figura 2. *Roadmap* para a diversidade e inclusão de gênero na indústria eólica.



Fonte: Noronha et al. (2024).

Este *roadmap* é uma estratégia abrangente que visa promover a igualdade de gênero e a inclusão no setor de energia eólica e propõe 13 ações que devem ser adotadas pelas organizações para promover a D&I de forma eficaz na indústria. As práticas propostas são apresentadas abaixo.

Prática 1 – Agenda estratégica

A inserção do tema de D&I na agenda estratégica das organizações é fundamental para criar um ambiente de trabalho que seja não apenas justo e equitativo, mas também inovador e competitivo. Ao definir a D&I como valor das organizações, devem ser traçadas metas claras e mensuráveis de inclusão de forma alinhada com os objetivos estratégicos da empresa, como metas de contratação, recrutamento, e de colaboração. A incorporação de D&I no planejamento estratégico de longo prazo das empresas garante que essas iniciativas sejam parte integral de seus objetivos futuros. É importante, também, atentar para a continuidade da estratégia traçada pela empresa, adotando medidas de engajamento, monitoramento, revisão e melhoria de estratégias traçadas na agenda.

Prática 2 – Política de D&I

Uma política de Diversidade e Inclusão (D&I) é essencial para firmar um compromisso formal e sistemático com a criação de um ambiente de trabalho inclusivo e diversificado. Para isso, as organizações devem estabelecer uma política abrangente que inclua tantos princípios, valores e objetivos alinhadas com a organização, declarando seu compromisso com a diversidade e inclusão, como também uma zero tolerância a comportamentos discriminatórios. O combate a preconceitos e discriminação deve ser uma prioridade, incluindo, por meio da inclusão de um código de conduta, medidas antidiscriminação e antiassédio. Medidas para assegurar o combate à discriminação salarial devem ser traçadas de forma transparente. Gestores e integrantes da equipe devem ser treinados para desenvolver sua habilidade em identificar micro agressões para mitigar sua ocorrência. Além disso, devem ser incluídas na política ações de suporte para apoiar grupos minoritários que sofram qualquer tipo de discriminação ou assédio.

Prática 3 – Sensibilização

Para promover a conscientização da importância da D&I no setor, ações de sensibilização que envolvam tanto colaboradores quanto líderes de maneira horizontal devem ser adotadas. Campanhas educativas, workshops e treinamentos que abordem preconceitos inconscientes e práticas inclusivas podem ser adotados como ações de sensibilização. Além disso, incentivar a disseminação de boas práticas é fundamental para que essas ações se tornem parte da cultura organizacional. Compartilhar histórias de sucesso, criar espaços para discussões abertas e reconhecer os esforços de indivíduos e equipes que promovem a inclusão são estratégias eficazes para engajar toda a organização na construção coletiva de um ambiente mais diverso e inclusivo.

Prática 4 – Comunicação

Para demonstrar o compromisso da empresa com a criação de um ambiente inclusivo e diversificado é importante que as organizações divulguem seus esforços, políticas e práticas de diversidade e inclusão (D&I) para os stakeholders. Estratégias de comunicação incluem a divulgação em eventos do setor, relatórios anuais, newsletters e reuniões dedicadas, garantindo que todos os stakeholders estejam informados sobre as iniciativas em andamento e os resultados alcançados. Além disso, é essencial estabelecer um espaço regular na agenda corporativa para discutir ideias e receber feedback contínuo sobre a evolução da política e das práticas implementadas. Esse espaço pode ser formalizado por meio de fóruns abertos, workshops colaborativos e grupos de discussão, nos quais colaboradores, líderes e stakeholders externos possam contribuir com sugestões e compartilhar melhores práticas, promovendo uma cultura organizacional de aprendizado e melhoria contínua em D&I.

Prática 5 – Quadro de pessoas

Ações para inserção de D&I no quadro de pessoas, metas claras de recrutamento e seleção devem ser traçadas para assegurar a inclusão de grupos sub-representados, além de avaliar continuamente a forma de recrutar para eliminar vieses no processo. Ampliar os canais de contratação, utilizando plataformas diversificadas e parcerias com organizações que promovem a inclusão, é igualmente crucial. Para assegurar o plano de carreira igualitário, planos de carreira personalizados para cada funcionário devem

ser traçados, alinhados às suas aspirações e potencial de crescimento. A avaliação regular das promoções deve garantir que os critérios sejam justos e transparentes, corrigindo quaisquer disparidades identificadas. Além disso, programas de mentoria para mulheres líderes como o *Women in Wind* tem demonstrado índices de sucesso importantes no setor. A implementar destes programas de mentoria, fornecendo orientação e desenvolvimento de habilidades, reforça o compromisso com a equidade de gênero na liderança.

Prática 6 – Ambiente interno

Visando assegurar a melhor experiência para as colaboradoras, uma avaliação regular permitirá avaliar se os benefícios oferecidos estão alinhados com suas expectativas. Para isso, pesquisas de direcionadas clima organizacional auxiliarão no mapeamento de necessidades específicas. Além de benefícios regulares da empresa, é importante considerar políticas de flexibilidade no trabalho, programas de suporte familiar, creches e outras iniciativas que promovam a igualdade de oportunidades e o equilíbrio entre vida pessoal e profissional. Esta prática permite que grupos mais vulneráveis não sejam afetados por decisões organizacionais, trazendo maior satisfação interna que, conseqüentemente, reflete nos resultados da organização. Manter um diálogo aberto e inclusivo sobre esses temas, além de oferecer canais de feedback contínuo, ajuda a criar um ambiente onde todas as colaboradoras se sintam valorizadas, respeitadas e integradas ao ambiente de trabalho. Treinamentos regulares sobre preconceitos inconscientes e práticas inclusivas devem ser traçados, incentivando a sensibilização e o respeito mútuo entre os funcionários. Monitorar e avaliar regularmente as práticas de D&I, por meio de feedbacks e indicadores de desempenho, também é essencial para garantir que as metas sejam alcançadas e que a cultura inclusiva seja fortalecida continuamente.

Prática 7 – Embaixadores

Frente a sub-representação das mulheres em cargos de liderança, programas de treinamento e capacitação para mulheres líderes são essenciais. Habilidades de liderança, negociação e gestão de equipes devem ser promovidas por meio de cursos direcionados, workshops e mentorias. Criar redes de apoio dentro da organização, como grupos de afinidade e programas de mentoria cruzada, proporciona um ambiente de suporte e colaboração. Ademais, é fundamental divulgar ativamente os esforços inclusivos das líderes femininas, destacando suas contribuições e impactos positivos na empresa. O reconhecimento dessas lideranças por meio da divulgação, recompensas e reconhecimentos formais permite o encorajamento de outras mulheres e grupos minoritários a alcançarem posições de destaque, além de contribuir para a redução de práticas discriminatórias. Fornecer maior visibilidade para as realizações das mulheres líderes através de eventos, publicações internas e participação em painéis externos também ajuda a promover inspiração em mulheres e incentivar o crescimento contínuo na carreira.

Prática 8 – Força-tarefa

Formadas por mulheres líderes, o estabelecimento de uma força-tarefa para promover a D&I em organizações seria responsável pela análise de iniciativas vigentes e passadas, identificando boas práticas e pontos críticos. Considerando a experiência existente e o cenário atual, a equipe poderia desenvolver análises em discussões abertas e colaborativas, traçando ações mitigadoras dos desafios. Como princípios norteadores a responsabilidade e a transparência seriam importantes de forma a compartilhar estes desafios com as organizações como um todo, incentivando o engajamento colaborativo com a causa.

Prática 9 – Manual de boas práticas

Um manual de boas práticas contemplando ações direcionadas a D&I permite a promoção de um ambiente de trabalho inclusivo e respeitoso nas organizações, abordando de forma abrangente as diferentes identidades e promovendo a eliminação de ações preconceituosas. O manual deve incluir diretrizes claras sobre comportamentos respeitosos, como o uso de linguagem inclusiva, o respeito às identidades de gênero e orientação sexual, e ações que devem ser evitadas para criar um ambiente seguro para todos. Além de definir políticas de tolerância zero para comportamentos discriminatórios, o manual pode oferecer exemplos práticos e cenários para orientar os colaboradores sobre como agir de maneira inclusiva e empática no ambiente de trabalho. Ao compartilhar essas diretrizes de forma ampla e garantir que todos

os funcionários compreendam e adotem essas práticas, as organizações reforçam seu compromisso com a diversidade e inclusão, criando um ambiente mais acolhedor e colaborativo para todos.

Prática 10 – Educação

Considerando a baixa representação de mulheres em áreas STEM, é estratégico estabelecer parcerias com instituições de ensino para oferecer cursos de capacitação e atualização. Esta colaboração permite não somente oportunidades de aprendizado contínuo para seus colaboradores, mas também fortalece a imagem da organização como apoiadora da educação e inovação tecnológica.

Prática 11 – Comunidade

A inserção da comunidade local nos empreendimentos eólicos é atualmente uma das boas práticas e uma das preocupações das organizações. Estratégias para capacitação local e inserção da mão de obra no projeto são essenciais, especialmente no âmbito de cargos de maior nível e lideranças. A mão de obra regional em localidades remotas possui pouca capacitação em níveis técnicos e estratégicos, especialmente quando se trata de mulheres e grupos minoritários. Nesse sentido, é importante que essa preocupação perpassa também a inserção de pautas de D&I. Parcerias com comunidades locais devem envolver a criação de oportunidades econômicas e educacionais para grupos sub-representados. Para isso, poderão incluir programas de capacitação profissional para moradoras da região, workshops sobre sustentabilidade ambiental e energias renováveis, e a promoção de práticas inclusivas de contratação e desenvolvimento de carreira.

Prática 12 – Pilares culturais

A cultura organizacional forma a base sólida de uma organização, englobando práticas, ações, valores, políticas e comportamentos que a definem. É por meio dos pilares culturais que se sustentam as iniciativas de Diversidade e Inclusão (D&I), desde a formulação de políticas e estratégias até a implementação de programas educacionais e práticas de recrutamento inclusivas. Portanto, é crucial promover uma cultura corporativa onde todos os colaboradores adotem e demonstrem ativamente comportamentos alinhados com valores de D&I.

Prática 13 – Benchmarking

O benchmarking entre organizações permite o aprendizado de sucessos e fracassos de outras organizações, adotando ideias inovadoras e adaptando-as para atender às suas próprias necessidades e metas estratégicas. Ao compartilhar experiências e aprendizados com outras organizações do setor eólico em reuniões, conferências, workshops e fóruns de discussão, as empresas podem adotar ideias inovadoras e adaptá-las às próprias necessidades e metas estratégicas. Esse compartilhamento é essencial para promover uma inclusão eficiente e eficaz no setor.

Em suma, o mapa de ações proposto representa um esforço organizado para abordar as disparidades de gênero em um campo técnico, promovendo práticas inclusivas, diversidade e igualdade dentro da indústria. As iniciativas delineadas buscam fortalecer a representação feminina e criar um ambiente de trabalho mais equitativo, inovador e sustentável para todos os colaboradores.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A diversidade e inclusão (D&I) de gênero no setor de energias renováveis é um tema crucial para promover a igualdade e a equidade. Embora tenham ocorrido avanços, ainda há desafios a serem superados. A presença feminina nesse campo é historicamente menor, especialmente em funções técnicas e de liderança. Considerando a projeção de geração de empregos no setor, a oferta de empregos deve considerar a presença feminina ao longo da cadeia, especialmente nas funções de menor representatividade.

Para promover a diversidade, é essencial criar um ambiente inclusivo, onde mulheres se sintam

valorizadas e tenham oportunidades iguais de crescimento profissional. Iniciativas como mentorias, programas de capacitação e políticas de contratação inclusivas são fundamentais para garantir que o setor de energias renováveis seja verdadeiramente diversificado e reflita a sociedade como um todo.

No entanto, superar a desigualdade de gênero vai além da representatividade numérica. Envolve permitir que as mulheres conquistem espaços de liderança e tomada de decisões. A diversidade de perspectivas e habilidades é fundamental para impulsionar a inovação e a sustentabilidade no setor eólico, tornando-o mais resiliente e eficiente. Ainda, recomenda-se que as empresas e instituições do setor, bem como a sociedade em geral, se envolvam ativamente na promoção de um ambiente inclusivo e equitativo, garantindo que todas as vozes sejam ouvidas e valorizadas.

A contribuição central do artigo reside em apresentar as principais práticas existentes frente aos desafios que são identificados em D&I no setor de energia eólica. Além disso, foram identificados de forma preliminar os caminhos que podem ser adotados em forma de um mapa de práticas que devem pavimentar as agendas das organizações nos próximos anos, garantindo que novas tecnologias de energia associadas a energia eólica (e.g. hidrogênio, armazenamento e eólicas offshore), possam iniciar os seus primeiros passos considerando D&I em seu cotidiano organizacional.

REFERÊNCIAS

ALI, M.; METZ, I.; KULIK, C. T. The Impact of work family programs on the relationship between gender diversity and performance. **Human Resource Management**, v. 54, p. 553-576, 2015.

ALLEN, E.; LYONS, H.; STEPHENS, J. C. Women's leadership in renewable transformation, energy justice and energy democracy: Redistributing power. **Energy Research & Social Science**, v. 57, p. 101233, 2019.

ARVIDSSON, S.; DUMAY, J. Corporate ESG reporting quantity, quality and performance: Where to now for environmental policy and practice? **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 3, p. 1091-1110, 2022.

BARUAH, B. Renewable inequity? Women's employment in clean energy in industrialized, emerging and developing economies. **A United Nations Sustainable Development Journal**, v. 41, 2016, p. 18-29. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/1477-8947.12105>>. Acesso em: 28 jun. 2024.

CHITIGA-MABUGU, M.; HENSELER, M.; MAISONNAVE, H.; MABUGU, R. Climate Change and Women - Impacts and Adaptation. **International Review of Environmental and Resource Economics**, v. 17, n.1, p.99-152, 2023.

CZAKO, V. **Employment in the Energy Sector**. Joint Research Centre, Publications Office of the European Union, 2020, 64p. Disponível em:<<https://doi.org/10.2760/95180>>. Acesso em: 11 fev. 2024.

EUROPEAN COMMISSION. **Union of Equality: Gender Equality Strategy 2020-2025**, 2020. Disponível em: < https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/policies/justice-and-fundamental-rights/gender-equality/gender-equality-strategy_en>. Acesso em: 07 jul. 2024.

FALCÃO, J. B. L.; STRAPASSON, A. B.; COSTA, H. K. M.; MASULINO, N. W. N.; BARBOSA, M. C. B. **Energy & Gender: An assessment on gender equality in the energy sector in Brazil**. Technical report commissioned by the British Embassy in Brazil in collaboration with the UK Prosperity Fund: Energy Programme, 2019, 81p. Disponível em: <<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.19253.52964>>. Acesso em: 13 jun. 2024.

FRAUNE, C. Gender matters: Women, renewable energy, and citizen participation in Germany. **Energy Research & Social Science**, v. 7, 2015, p. 55-65. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.02.005>>. Acesso em: 14 fev. 2024.

GARG, S.; SANGWAN, S. Literature Review on Diversity and Inclusion at Workplace. **Vision**, v. 25, n. 1, p. 12–22, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0972262920959523>>. Acesso em: 17 fev. 2024.

GWNET (GLOBAL WOMEN'S NETWORK FOR THE ENERGY TRANSITION). **Women for Sustainable Energy: Strategies to Foster Women's Talent for Transformational**. 2019. Disponível em: <<https://www.globalwomennet.org/women-for-sustainable-energy/>>. Acesso em: 01 mar. 2023.

IRENA (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY). Renewable Energy and Jobs, **Annual Review**. 2021. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2021/Oct/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2021>>. Acesso em: 22 mar. 2023.

IRENA (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY). Renewable Energy and Jobs. **Annual Review**, 2020. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Renewable-Energy-and-Jobs-Annual-Review-2020>>. Acesso em: 21 jul. 2023.

IRENA (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY). **Wind Energy: A Gender Perspective**. 2020. Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2020/Jan/Wind-energy-A-gender-perspective>>. Acesso em: 12 mar. 2023.

KAKABADSE, N. K.; FIGUEIRA, C.; NICOLOPOULOU, K.; YANG, J. H.; KAKABADSE, A. P.; ÖZBILGIN, M. F. Gender Diversity and Board Performance: Women's Experiences and Perspectives. **Human Resource Management**, v. 54, p. 265-281, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/hrm.21694>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

KREITZ, P. A. Best practices for managing organizational diversity. **The Journal of Academic Librarianship**, v. 34, n. 2, p. 101-120, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.acalib.2007.12.001>>. Acesso em: 01 fev. 2024.

MCKINSEY AND COMPANY. **Diversity wins: How inclusion matters**, 2020. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/featured-insights/diversity-and-inclusion/diversity-wins-how-inclusion-matters>>. Acesso em: 07 jul. 2024.

MENDES, A. S. J. Diversidade de Género e Desempenho: Uma Revisão Sistemática de Literatura. **Dissertação** (Mestrado em Ciências Empresariais). Universidade de Lisboa, 2016.

NKOMO, S. M.; COX, T. C., JR. Diversidade e identidade nas organizações. In: CLEGG, S. R.; HARDY, C.; NORD, W. R. **Handbook de Estudos Organizacionais**. São Paulo: Atlas, 1999. p.334-360.

NOLAND, M.; MORAN, T.; KOTSCHAWAR, B. Is Gender Diversity Profitable? Evidence from a Global Survey. **Working Paper Series**. Peterson Institute for International Economics, 2016.

NORONHA, M. E. S.; LUCENA, J. A. Y.; VIEIRA, F.S.; SOUZA, L. J. Os desafios para a diversidade e inclusão de gênero na indústria eólica e a perspectiva ESG das organizações. **Journal of Lifestyle and SDG's Review**, v.4, 2024. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.37497/2965-730X.SDGsReview.v4.n00.pe01584>>. Acesso em: 03 mai. 2024.

OPSTRUP, N.; VILLADSEN, A. R. The Right Mix? Gender Diversity in Top Management Teams and Financial Performance. **Public Administration Review**, v. 75, p. 291-301, 2014.

OSMAN-ELASHA, B. **In The Shadow of Climate Change**. UN Chronicle, v.6, n. 4, abr. p. 54-55, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.18356/5d941c92-en>>. Acesso em: 07 jul. 2024.

PEARL-MARTINEZ, R.; STEPHENS, J. C. Toward a gender diverse workforce in the renewable energy transition. **Sustainability: Science, Practice and Policy**, v. 12, n. 1, p. 8-15, 2016.

PERRYMAN, A. A.; FERNANDO, G. D.; TRIPATHY, A. Do gender differences persist? An examination of gender diversity on firm performance, risk, and executive compensation. **Journal of Business Research**, v. 69, p. 579-586, 2015.

SHORE, L. M.; RANDEL, A. E.; CHUNG, B. G.; DEAN, M. A.; EHRHART, K. H.; SINGH, G. Inclusion and Diversity in Work Groups: A Review and Model for Future Research. **Journal of Management**, v. 37, n. 4, p. 1262-1289, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/0149206310385943>>. Acesso em: 01 mar. 2024.

SINGH, V.; VINNICOMBE, S. Why So Few Women Directors in Top UK Boardrooms? Evidence and Theoretical Explanations. **Corporate Governance**, v. 12, p. 479 488, 2004.

WWF (WORLDWIDE FUND FOR NATURE). Women In Wind: **A Missing Piece of the EU Offshore Renewable Energy Transition**, jul. 2023. Disponível em: <<https://www.wwf.eu/?11764316/Women-in-wind-A-missing-piece-of-the-EU-offshore-renewable-energy-transition>>. Acesso em: 07 jul. 2024.

Estimativa do potencial do recurso eólico em um ponto estratégico da Margem Equatorial Brasileira

Karen Fernanda Teixeira Braz Lima¹, Nicolas de Assis Bose¹, Vanessa de Almeida Dantas¹, Alessandro Rene Souza do Espírito Santo¹, Samira de Azevedo Santos Emiliavaca¹, Ana Cleide Bezerra Amorim¹, Maria de Fátima Alves de Matos¹, Luciano André Cruz Bezerra¹, Leonardo de Lima Oliveira¹, Raniere Rodrigues Melo de Lima¹, Antônio Marcos de Medeiros¹.

1 Instituto SENAI de Energias Renováveis (ISI-ER)

karenlima@isi-er.com.br, nicolasbose@isi-er.com.br, vanessadantas@isi-er.com.br,
alessandrosanto@isi-er.com.br, samira@isi-er.com.br, anaamorim@isi-er.com.br, fatimamatos@isi-er.com.br,
luciano@isi-er.com.br, leonardooliveira@isi-er.com.br, ranierelima@isi-er.com.br,
ammedeiros@isi-er.com.br

RESUMO

A energia eólica no Brasil está consolidada e, existe uma perspectiva de crescimento do setor nos anos subsequentes. A Margem Equatorial Brasileira - MEB, destaca-se por sua diversidade fisiográfica e meteorológica, compreendendo o litoral de seis estados brasileiros: Amapá, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. O objetivo do presente trabalho consiste em: caracterizar a variabilidade diária do vento da área do projeto; caracterizar os padrões direcionais dos ventos em várias camadas atmosféricas; caracterizar as velocidades dos ventos nas respectivas alturas; e estimar a produção energética da região. Foram utilizados dados de velocidade e direção do vento a 100, 120 e 150 metros de altura acima do nível médio do mar, correspondente ao ano 2023, medidos pelo LiDAR ZX300 que está localizado no Terminal Salineiro de Areia Branca no Rio Grande do Norte, mais conhecido como Porto-Ilha. Em todas as alturas, os setores de direção do vento com maior ocorrência são os de sudeste (SE) e de nordeste (NE), e em segundo lugar a direção leste (E). Para a estimativa de produção energética, 2 aerogeradores de referência foram considerados, sendo eles: o IEA 15MW 240 RWT (GAERTNER et al., 2020) e o NREL Reference 8MW 180 (MUSIAL et al., 2016).

Palavras-chaves:

Energia eólica; Meteorologia; Potencial eólico; Nordeste brasileiro; LiDAR; Offshore

ABSTRACT

Wind energy in Brazil is consolidated and there is a prospect of growth in the sector in the following years. The Brazilian Equatorial Margin - MEB, stands out for its physiographic and meteorological diversity,

comprising the coast of six Brazilian states: Amapá, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará and Rio Grande do Norte. The objective of this work is to: characterize the daily wind variability of the project area; characterize the directional patterns of the winds in several atmospheric layers; characterize the wind speeds at the respective heights; and estimate the energy production of the region. Wind speed and direction data at 100, 120 and 150 meters above mean sea level, corresponding to the year 2023, measured by the LiDAR ZX300 located at the Areia Branca Salt Terminal in Rio Grande do Norte, better known as Porto-Ilha, were used. At all times, the wind direction sectors with the highest occurrence are the southeast (SE) and northeast (NE), and in second place the east (E) direction. To estimate energy production, 2 reference wind turbines were considered, namely: the IEA 15MW 240 RWT (GAERTNER et al., 2020) and the NREL Reference 8MW 180 (MUSIAL et al., 2016).

Keywords:

Wind energy; Meteorology; Wind potential; Northeast; LiDAR; Offshore

1. INTRODUÇÃO

A energia é um ingrediente essencial para o crescimento econômico e o consumo per capita, podendo ser usado como um indicativo de desenvolvimento social e da qualidade de vida de uma população (GOLDEMBERG, 1998). No entanto, a questão energética é preocupação urgente, já que os processos convencionais de geração de energia elétrica estão entre os principais responsáveis pelas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (PAZHERI et al., 2014). Desde a revolução industrial, o mundo passou por diversas crises de energia e o modelo energético adotado pelos países continuou baseado no uso de recursos não renováveis como carvão e petróleo. O problema nas últimas décadas tem se agravado por crises político-sociais nas regiões produtoras, custo dos combustíveis fósseis, aumento da demanda energética e necessidade de redução das emissões.

A indústria eólica teve seu segundo melhor ano em 2021, com 93,6 GW de capacidade adicionada globalmente, conforme dados do Global Wind Energy Council GWEC (GWEC, 2022). A capacidade total acumulada alcançou 837 GW. Na comparação ano a ano, o crescimento de 12% em relação a 2020 foi 1,8% menor do que a taxa observada anteriormente. Enquanto os dois maiores mercados do mundo, China e EUA, instalaram menos capacidade eólica terrestre no ano passado — 30,7 GW e 12,7 GW, respectivamente — outras regiões tiveram anos recordes. Europa, América Latina e África e Oriente Médio aumentaram as novas instalações onshore em 19%, 27% e 120%, respectivamente. O Brasil é um país privilegiado sob o aspecto energético, pois seu relevo, hidrografia e clima tropical permitem o aproveitamento das diversas fontes renováveis de energia, como a hidráulica, biomassa, eólica e solar (AMARANTE et al., 2001; MARTINS et al., 2008; COSTA et al., 2013; SCHMIDT et al., 2016). A Figura 1.1 mostra a participação das diversas fontes de energia na matriz elétrica brasileira, sendo que as usinas hidrelétricas contribuem com mais da metade da geração de eletricidade.

As potenciais tecnologias para aproveitar as fontes de energia renováveis são substanciais e excedem todas as outras fontes já disponíveis. As mudanças climáticas, a redução das emissões de CO₂, o esgotamento das reservas de combustíveis fósseis e o aumento dos preços dos combustíveis têm levado

a um maior apoio governamental, por meio da adoção de leis e regulamentos, estímulo e comercialização de fontes de energia renováveis. A energia eólica cresceu consideravelmente em todo o mundo e a capacidade instalada aumentou significativamente nos últimos anos, comprovando que a energia eólica é uma fonte de energia competitiva e econômica. Atualmente, existem operando no Brasil 734 usinas eólicas (18,87 GW), e, em construção e com construção a se iniciar são mais 334 empreendimentos, o que significa um acréscimo de 12,19 GW à matriz elétrica brasileira, o que elevará o setor para próximo da marca de 31 GW de capacidade instalada total (ANEEL, 2021).

A energia eólica no Brasil está consolidada e, existe uma perspectiva de crescimento do setor nos anos subsequentes, seja com a expansão da energia eólica onshore e/ou com a implantação de empreendimentos eólicos offshore. A Margem Equatorial Brasileira - MEB, área a ser estudada neste projeto, destaca-se por sua diversidade fisiográfica e meteorológica. Compreendendo o litoral de seis estados brasileiros: Amapá, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte. São cerca de 2.849 km de extensão (38,6% de litoral brasileiro) com presença de arquipélagos, cabos, baías, lagoas e rios, e largura da plataforma continental variável (DRAGAUD et al., 2020), atingindo seu ápice de 400 km na costa do Pará. Do ponto de vista meteorológico, a região é influenciada por sistemas em grande escala como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistemas em mesoescala como as circulações termicamente induzidas, caracterizadas pelas brisas terrestre, marítima, de rio, dentre outros (SOUZA e OYAMA, 2017).

A MEB é considerada uma região de interesse estratégico para o país. Sua posição geográfica está inserida no contexto das Bacias Sedimentares de exploração petrolífera: Foz do Amazonas, Pará-Maranhão/Barreirinhas e Potiguar, e as recentes descobertas de óleos leves, indicam grande potencial exploratório. Isso leva à inserção de novas fontes renováveis de energias para suprir o desenvolvimento da atividade industrial e tecnológica desta região, uma vez que, sua localização geográfica encontra-se próxima dos maiores mercados consumidores do mundo (ANP, 2021), porém, a contraponto, o índice de desenvolvimento humano dessa região (0,664, 2019) em relação à média brasileira (0,765, 2019) é menor. Estados como Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí possuem excelentes potencialidades para instalação das usinas eólicas offshore, considerando nesse contexto, a grande quantidade de solicitações junto ao IBAMA para a instalação de usinas em mar e estudos prévios realizados pela Equipe do ISI-ER em projetos de P&D ANEEL. Dessa maneira, o objetivo do presente trabalho consiste em: avaliar as condições atmosféricas da Margem Equatorial Brasileira (MEB), mais especificamente em Areia Branca/RN, por meio de parâmetros climatológicos e caracterizar a variabilidade diária da área do projeto; caracterizar os padrões direcionais dos ventos em várias camadas atmosféricas; caracterizar as velocidades dos ventos; e estimar o potencial eólico na área de estudo.

2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Alguns mecanismos de circulação interagem com mais intensidade quando se considera a MEB, como a célula de circulação de Hadley e suas consequências, como o surgimento de um cinturão de convergência ao redor do globo que caracteriza a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e conseqüentemente, a convergência dos ventos alísios. Além disso, a variabilidade da chuva sazonal

durante a estação chuvosa é diretamente dependente dos mecanismos climáticos de grande escala que se processam nos dois oceanos tropicais adjacentes: O Oceano Pacífico e o Oceano Atlântico (De SOUZA et al., 2004).

A ZCIT é um dos mais importantes sistemas meteorológicos atuando nos trópicos. Devido à sua estrutura física, tem se mostrado decisiva na caracterização das diferentes condições de tempo e de clima em diversas áreas da Região Tropical (FERREIRA, 1996). Especialmente na MEB, a ZCIT é um dos principais sistemas moduladores de precipitação (Figura 1). No Nordeste Brasileiro (NEB), o posicionamento e a intensidade da ZCIT são parâmetros importantes para o quantitativo da estação chuvosa da região (UVO, 1988). De forma análoga, a posição mais austral da ZCIT age como indutor de chuva na MEQ, e o regime de precipitação da Amazônia, apresenta máximos durante os meses do verão (dezembro, janeiro e fevereiro – DJF) e outono (março, abril e maio – MAM), sendo que os mínimos ocorrem durante os meses de inverno (junho, julho e agosto – JJA) e primavera (setembro, outubro e novembro – SON), (DE SOUZA et al., 2000; Souza e Cunha, 2010).

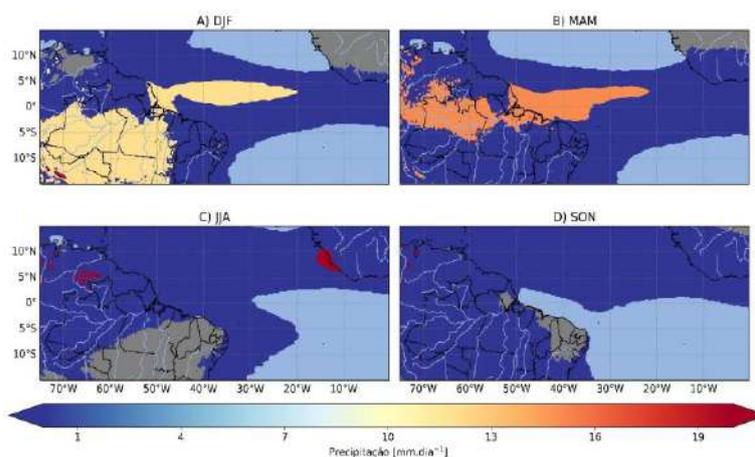


Figura 1 - Climatologia de precipitação mm.dia-1. Fonte: ERA5 (1991 a 2020).

Como bem descrito por De Souza et al. (2004), o gradiente de temperatura da superfície do mar (TSM) para o norte apresenta simultaneamente anomalias de TSM positivas/negativas nos setores norte/sul do Atlântico Tropical. O inverso é observado quando o gradiente de TSM aponta para o sul, anomalias de TSM negativas/positivas são observadas nos setores norte/sul do Atlântico Tropical. Este comportamento na TSM foi inicialmente chamado de dipolo de TSM do Atlântico Tropical (MOURA E SHUKLA,1981), atualmente também é conhecido como gradiente inter-hemisférico da bacia do Atlântico (DE SOUZA et al., 2005). O gradiente é identificado pela diferença entre as anomalias TSM (ATSM) sobre as áreas Norte (5 - 20°N, 60-30°W) e Sul (0-20°S, 30°W-10°E) do oceano Atlântico Tropical.

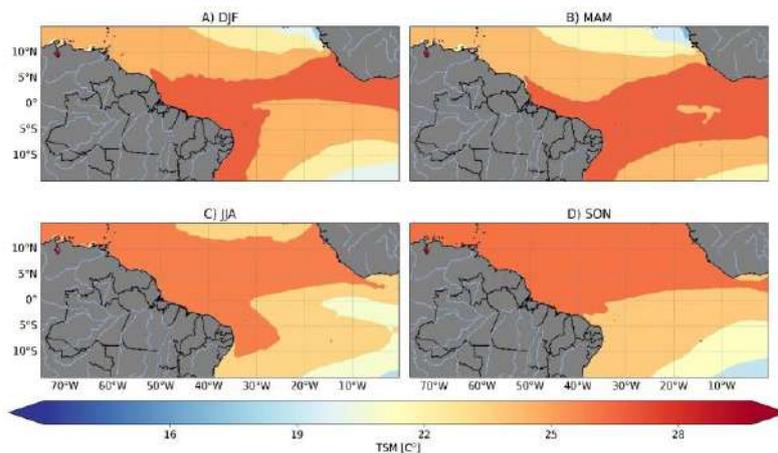


Figura 2 - Climatologia de Temperatura da superfície do mar (TSM) do período de 1991 a 2020. Fonte: ERA5.

A ZCIT prefere regiões com máximas TSM (FERREIRA E MELO, 2005), ou seja, em anos em que se observa um gradiente de TSM inter-hemisférico do Atlântico Tropical, a posição mais ao sul da ZCIT é alterada (NOBRE E SHUKLA, 1996) favorecendo condições mais secas ou mais úmidas que o normal sobre a região da MEB. A Figura 2 mostra a climatologia da TSM na região do Atlântico Tropical, valores máximos são observados na região do equador nos meses de verão (DJF) e outono (MAM), nas estações de inverno e primavera essa região se posiciona ao norte da América do Sul.

A medição da velocidade do vento para a definição do local exato de instalação das turbinas deve ser executada com precisão e, para isso, recorre-se comumente ao uso de sensores, sendo eles por medição direta, como anemômetros de copos, ou por sensoriamento remoto, como equipamentos LiDAR. A determinação da direção do vento na região em que será instalado um parque eólico é fundamental para que seja definida a localização das turbinas. Além disso, mudanças muito frequentes de direção podem indicar situações de rajadas de vento. O objetivo de uma turbina eólica é converter a maior quantidade possível de energia cinética da parcela de ar em movimento em energia mecânica, que depois é convertida em energia elétrica pelo gerador (Mauad *et al.*, 2017).

3. MÉTODO DO ESTUDO

As medições de direção e velocidade do vento foram obtidas por meio de um equipamento LiDAR ZX300, instalado no Terminal Salineiro de Areia Branca, no Rio Grande do Norte, mais conhecido como Porto-Ilha (-4.8180 S, -37.0444 O). O Porto-Ilha é responsável pela exportação do sal a granel do Brasil, sendo o único terminal offshore do mundo criado para esse tipo de produto. O município de Areia Branca está localizado na região equatorial, que proporciona pouca variabilidade na temperatura média devido à constante incidência de radiação solar. Segundo os critérios da classificação climática de Köppen, o Rio Grande do Norte possui dois tipos de clima: tropical com verão seco e semiárido. A cidade de Areia Branca está inserida no clima tropical com verão seco (As), sendo a estação chuvosa concentrada de maio a julho, com médias pluviométricas entre 1.000 e 1.600 milímetros, e a estação seca na primavera e início do verão.

A parceria firmada entre a administração do Porto-Ilha e o ISI-ER tornou possível a instalação de uma base experimental de medições offshore, criada para dar suporte ao desenvolvimento de projetos do Instituto. A infraestrutura é composta por um LiDAR ZX300, que fornece medições de vento (velocidade e direção) em diferentes alturas (de 10 a 300 metros). Foram utilizados dados de velocidade e direção do vento a 100 e 150 metros de altura acima do nível médio do mar, correspondente ao período de janeiro de 2023 a dezembro de 2023. Além das duas alturas de medição mencionadas, uma estimativa de produção foi calculada com dados de velocidade do vento extrapolados para a altura de 120 m. Para a extrapolação vertical, foram utilizadas medições realizadas nas alturas de 70, 100, 150 e 200 m acima do nível médio do mar e foi considerada a Lei da Potência (GUALTIERI, 2019).



Figura 3 - Localização geográfica do LiDAR instalado em Porto-Ilha no município de Areia Branca no Rio Grande do Norte.

Para a estimativa de produção energética, 2 aerogeradores de referência foram considerados, sendo eles: o IEA 15MW 240 RWT (GAERTNER et al., 2020) e o NREL Reference 8MW 180 (MUSIAL et al., 2016). As especificações técnicas de cada um deles são apresentadas nas Tabela 1 a seguir.

Nome	NREL Reference 8MW 180	IEA 15MW 240 RWT
Potência nominal [MW]	8	15
Velocidade do vento (potência nominal) [m/s]	12	10,59

Velocidade do vento - Cut-in [m/s]	4	3
Velocidade do vento - Cut-out [m/s]	25	25
Diâmetro do rotor [m]	180	240
Controle	Velocidade variável/controle por pitch	Velocidade variável/controle por pitch

Tabela 1 - Especificações dos aerogeradores de referência

Para o ajuste das curvas de potência, foi utilizado o dado de densidade extraído do Global Wind Atlas, para as proximidades do Porto Ilha. O valor se trata de uma média para a série histórica (30 anos), sendo igual a 1,14 kg/m³. O ajuste foi realizado seguindo a equação Eq. 1, definida pela norma IEC 61400-12-1, para aerogeradores regulados por controle de pitch.

$$V_n = V_{10min} \left(\frac{\rho_{10min}}{\rho_{ref}} \right)^{1/3} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

- V_n é a velocidade de vento ajustada [m/s] para a curva de potência;
- V_{10min} é a velocidade de vento local [m/s];
- ρ_{10min} é a densidade do ar local [kg/m³];
- ρ_{ref} é a densidade de referência (1,225 kg/m³).

As curvas de potência ajustadas, para cada aerogerador de referência considerado, são apresentadas pelas Figuras 4 e 5.

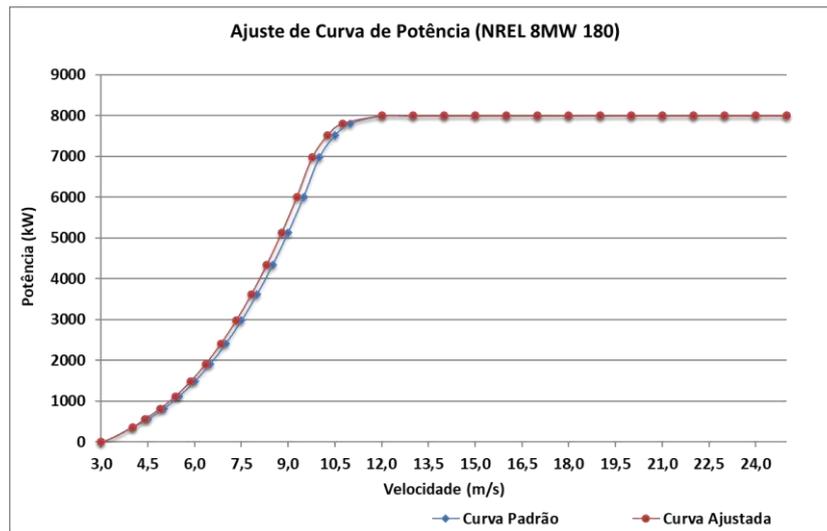


Figura 4 – Curva de potência ajustada para o aerogerador NREL Reference 8MW 180.

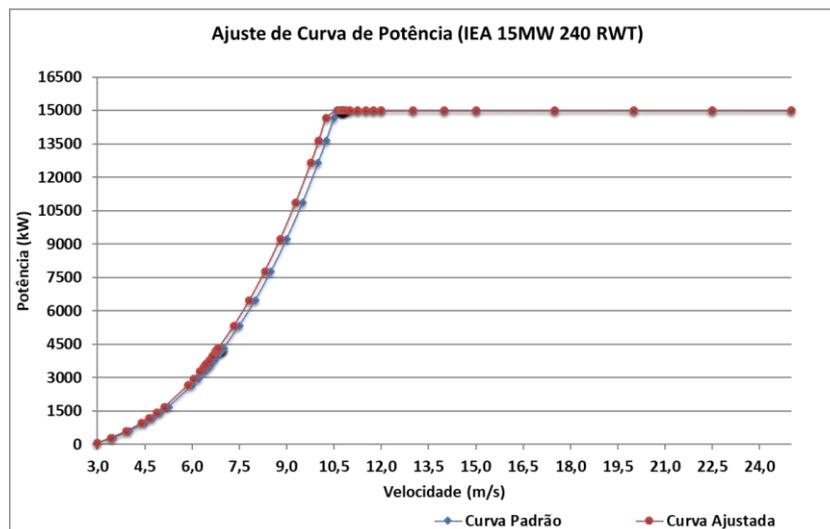


Figura 5 - Curva de potência ajustada para o aerogerador IEA 15MW 240 RWT.

A estimativa de produção energética foi calculada levando em consideração 3 métodos diferentes: diretamente da série temporal (Método I), do histograma resultante da série temporal de medição (Método II) e do histograma resultante do ajuste da função de densidade de probabilidade Weibull (WAIS, 2017) ao histograma medido (Método III).

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

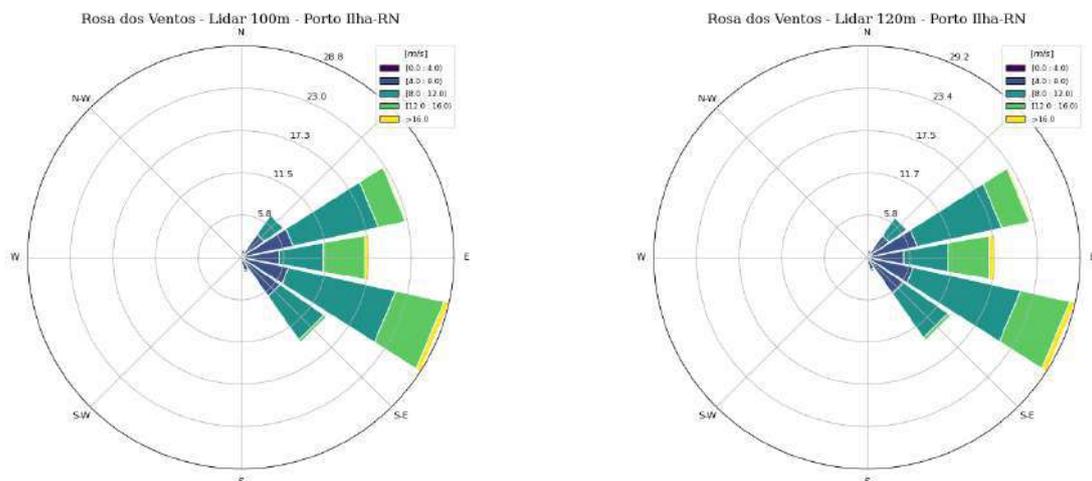
A Tabela 2 apresenta a estatística descritiva dos dados de velocidade do vento (m/s) nas alturas de 100, 120 e 150 metros em Porto-Ilha/RN. A média da velocidade do vento foi de 9,25 m/s na altura de 100 metros, 9,35 m/s à 120 metros e 9,95 m/s à 150 metros, e 50% dos dados da variável foram representados

por 9,11 m/s, 9,34 m/s e 9,26 m/s, respectivamente. Para as alturas de 100, 120 e 150 metros, os valores máximos da velocidade do vento foram 19,73, 19,94 e 20,27 m/s, respectivamente.

	Média [m/s]	Mediana [m/s]	Desvio Padrão [m/s]	Variância [m/s]	Máximo [m/s]	Mínimo [m/s]
100m	9,259	9,065	3,066	0,456	19,735	9,397
120m	9,353	9,156	3,091	0,464	19,942	9,553
150m	9,954	9,250	3,127	0,457	20,272	9,777

Tabela 2 - Estatística descritiva da velocidade do vento diária (m/s) em Porto-Ilha/RN no período de janeiro de 2023 a dezembro de 2023.

Na Figura 6 estão representadas as rosas do vento em Porto-Ilha, para as respectivas alturas de 100, 120 e 150 metros. A determinação da direção do vento foi realizada a partir das médias diárias referente ao período analisado. Em todas as alturas, os setores com maiores ocorrências de direção do vento são de sudeste (SE) e nordeste (NE), em segundo lugar, a direção leste (E), com velocidades mais frequentes entre 7 e 9 m/s. Observa-se que a variabilidade da direção do vento é baixa em todas as alturas, tendo predominâncias de vento de SE a maior parte do período analisado, o que seria ideal para aproveitamento eólico. A baixa variabilidade na direção do vento também é crucial para minimizar o desgaste dos rotores das turbinas eólicas (Jacondino et al., 2019).



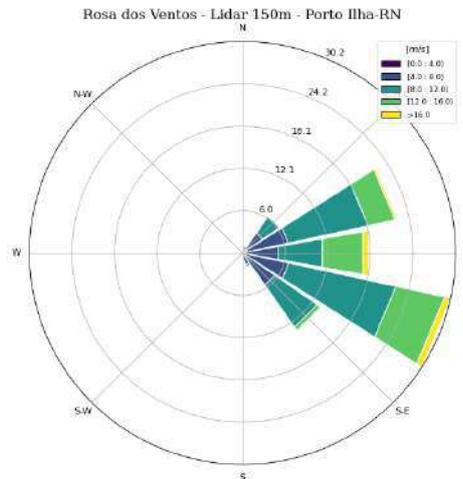


Figura 6 - Rosas dos ventos em Porto-Ilha nas alturas de 100, 120 e 150 metros. Autoria própria (2024)

A Figura 7 apresenta a velocidade média diária do vento em Porto-Ilha nas alturas de 100, 120 e 150 metros. Nota-se que o comportamento da velocidade do vento é bem parecido em todas as alturas analisadas, e a intensidade é ligeiramente maior à 150 metros. Em relação a sazonalidade, embora não tenhamos apenas um conjunto de dados de um ano completo, já foi possível observar que as maiores velocidades do vento se concentram entre os meses de setembro a dezembro de 2023, onde foram observados valores próximos de 14 m/s a 150 metros de altura em Porto-Ilha/RN. E sob outra perspectiva, os menores valores de velocidade do vento foram observados entre os meses fevereiro e maio de 2023. Vale ressaltar que, para determinar a climatologia da velocidade e direção do vento de uma determinada localidade, é necessário possuir um conjunto de dados superior a 20 anos, sendo que o ideal são 30 anos de dados, mas no caso de Porto-Ilha, foram analisados apenas 12 meses de dados.

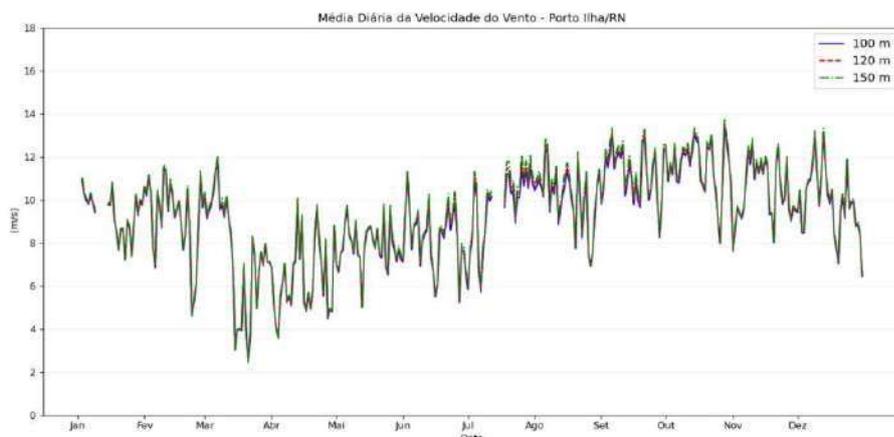


Figura 6 - Velocidade média diária do vento em Porto-Ilha nas alturas de 100, 120 e 150 metros no ano de 2023.

As Tabelas 3 e 4 apresentam as estimativas de geração energética, considerando os 3 métodos, para os dois aerogeradores de referência escolhidos. Para ambos os aerogeradores, os Fatores de Capacidade (FC) resultantes são próximos, estando em torno de 0,65. Entre as diferentes alturas, não se observa uma variação significativa entre os FC calculados, uma vez que as velocidades de vento são próximas em magnitude.

Altura de medição [m]	Método I		Método II		Método III	
	Produção [MWh]	FC	Produção [MWh]	FC	Produção [MWh]	FC
100	43.116,76	0,62	47.002,43	0,67	45.421,88	0,65
120	43.713,90	0,62	47.615,14	0,68	46.007,69	0,66
150	44.331,29	0,63	48.246,39	0,69	46.607,66	0,67

Tabela 3 - Estimativa de geração para o aerogerador NREL Reference 8MW 180.

Altura de medição [m]	Método I		Método II		Método III	
	Produção [MWh]	FC	Produção [MWh]	FC	Produção [MWh]	FC
100	80.106,37	0,61	87.421,08	0,67	84.580,75	0,64
120	81.236,73	0,62	88.579,23	0,67	85.696,43	0,65
150	82.406,56	0,63	89.780,80	0,68	86.841,32	0,66

Tabela 4 – Estimativas de geração para o aerogerador IEA 15MW 240 RWT

A Tabela 5 apresenta o acréscimo na estimativa de geração, para o período analisado. Analisando todos os métodos em conjunto, para ambos os aerogeradores, é possível observar um acréscimo entre 1,29 % e 1,38 % na geração do período, saindo da altura de 100 m para 120 m. Considerando o salto de 100 m para 150 m, o acréscimo encontrado foi entre 2,61 % e 2,87 %.

Aerogeradores de referência	Acréscimo em altura	Acréscimo na geração [%] - Método I	Acréscimo na geração [%] - Método II	Acréscimo na geração [%] - Método III
NREL Reference 8MW 180	100 m para 120 m	1,38	1,30	1,29
	100 m para 150 m	2,82	2,65	2,61
IEA 15MW 240 RWT	100 m para 120 m	1,41	1,32	1,32
	100 m para 150 m	2,87	2,70	2,67

Tabela 5 – Acréscimos na produção energética, entre as alturas de medição.

Quanto ao método utilizado, a estimativa de geração calculada pelo Método II resultou nas maiores produções energéticas, para ambos os aerogeradores escolhidos. O cálculo da produção energética pelo histograma, seja ele o resultante da série temporal (Método II) ou o resultante do ajuste de curva de Weibull (Método II) superestimam a estimativa com relação ao calculado diretamente da série temporal de medição (Método I).

Estudos anteriores de mapeamento do potencial eólico brasileiro apontam velocidades médias diárias superiores a 7,5 m/s nas regiões costeiras do Nordeste, principalmente nos estados do Rio Grande do Norte e norte do Ceará (Amarante et al., 2001). O maior potencial eólico brasileiro ocorre na região Nordeste e tem a melhor ocorrência de ventos no período de menor potencial hídrico do ano naquela região, no segundo semestre (ANEEL, 2008). Além disso, resultados obtidos por Gilliland e Keim (2017)

na avaliação de dados observados e diferentes reanálises do período compreendido entre 1980 e 2014, a região Nordeste apresenta tendência estável de velocidade do vento, ou seja, baixa variabilidade, com destaque para a faixa litorânea leste e norte.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Uma da estimativa de produção energética foi executada, utilizando dados de medição de velocidade e direção do vento de 10 minutos, no período de janeiro a dezembro de 2023, medidos por um equipamento LiDAR, instalado no Terminal Salineiro Porto Ilha, localizado a 14 km da costa da cidade de Areia Branca/RN.

Foram consideradas séries temporais em 3 alturas de medição diferentes (100 m, 120m e 150m), bem como 3 metodologias diferentes de cálculo da produção energética e dois aerogeradores de referência, com potências nominais de 8 MW e 15 MW. Quanto as alturas de medição, os resultados apresentaram baixa variação na produção energética, indicando que um alto potencial de geração pode ser aproveitado mesmo com aerogeradores com altura de hub convencionais (próximo ao 100 m de altura). Quanto a metodologia, as estimativas calculadas por meio dos histogramas, resultantes da série temporal de medição e do ajuste de curva de Weibull, superestimaram a geração em comparação à estimativa resultante diretamente da série temporal de velocidade do vento.

Os resultados apresentados neste estudo podem servir como ferramenta de apoio a tomada de decisão para o planejamento de empreendimentos eólicos, uma vez que, a energia eólica no Brasil está consolidada e, existe uma perspectiva de crescimento do setor nos anos subsequentes.

REFERÊNCIAS

Amarante, O. A. C., Brower, M., Zack, J., & de Sá, A. L. (2001). Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Brasília: Ministério de Minas e Energia.

ANEEL. (2008). Agência Nacional de Energia Elétrica. Ministério de Minas e Energia. Atlas de Energia Elétrica do Brasil (3ª ed.). Brasília: ANEEL.

ANEEL. (2021). Outorgas e Registros de Geração: Unidades consumidoras com geração distribuída. Brasília: SCG. Retrieved from http://www.aneel.gov.br/outorgas/geracao/-/asset_publisher/mJhnKli7qcJG/content/registro-de-central-geradora-de-capacidade-reduzida/655808

ANP. (2021). Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário Estatístico.

Costa, A. O., Oliveira, L. B., Lins, M. P. E., Silva, A. C. M., Araújo, M. S. M., & Pereira Júnior, A. O. et al. (2013). Sustainability analysis of biodiesel production: A review on different resources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 407-412.

de Souza, E. B., Kayano, M. T., & Ambrizzi, T. (2004). The regional precipitation over the eastern Amazon/northeast Brazil modulated by tropical Pacific and Atlantic SST anomalies on weekly timescale. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19(2), 113-122.

de Souza, E. B., Kayano, M. T., Tota, J., Pezzi, L., Fisch, G., & Nobre, C. (2000). On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. *Acta Amazônica*, 30, 305-318.

Dragaud, I. C. D. V., Soares da Silva, M., Assad, L. P. d., et al. (2019). The impact of SST on the wind and air temperature simulations: A case study for the coastal region of the Rio de Janeiro state. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 131, 1083-1097. <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0622-5>

Ferreira, N. S. (1996). Zona de Convergência Intertropical. *Climanálise-Boletim de Monitoramento e Análise Climática*, 10a, Edição comemorativa.

Gaertner E., Jennifer R., Latha S., Frederik Z., Benjamin A., Garrett B., Nikhar A., Fanzhong M., Pietro B., Witold S., George S., Roland F., Henrik B., Katherine D., Matt S., Christopher A., and Anthony V.. 2020. Definition of the IEA 15-Megawatt Offshore Reference Wind. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-75698. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75698.pdf>

Gilliland, J. M., & Keim, B. D. (2017). Position of the South Atlantic Anticyclone and its impact on surface conditions across Brazil. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 57(3), 535.

Goldemberg, J. (1998). Leapfrog energy technologies. *Energy policy*, 26(10), 729-741.

GUALTIERI, G. A comprehensive review on wind resource extrapolation models applied in wind energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 102, p. 215–233, mar. 2019.

GWEC. (2022). Global offshore wind report 2022. Retrieved from <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2022>.

Jacondino, W., Calvetti, L., Nascimento, A. L., Beneti, C., Paz, S., & Jadalla, O. (2019). Análise estatística do vento em dois parques eólicos no Rio Grande do Norte. *Anuario do Instituto de Geociencias*, 42, 230-244. https://doi.org/10.11137/2019_2_230_244

Köppen, W., & Geiger, R. (1928). *Klimate der Erde*. Gotha: Justus Perthes Verlag.

Musial, W., Philipp B., Suzanne T., and Aaron S.. 2016. Potential Offshore Wind Energy Areas in California: An Assessment of Locations, Technology, and Costs. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-67414. <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67414.pdf>

Pazheri, F. R., Othman, M. F., & Malik, N. H. (2014). A review on global renewable electricity scenario. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 835-845.

Souza, E. B. D., & Cunha, A. C. D. (2010). Climatologia de precipitação no Amapá e mecanismos climáticos de grande escala. *Tempo, Clima e Recursos Hídricos: Resultados do Projeto REMETAP no Estado do Amapá*.

Souza, D. C. D., & Oyama, M. D. (2017). Breeze potential along the Brazilian northern and northeastern coast. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 9, 368-378.

Uvo, C. B.. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação na Região Norte do Nordeste brasileiro. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE. São José dos Campos, SP. 1989.

World Meteorological Organization. (2018). World Meteorological Organization. Disponível em <http://www.wmo.int>.

BOAS PRÁTICAS EM SEGURANÇA DO TRABALHO NA INSTALAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS *OFFSHORE*: PROPOSTA PARA O BRASIL

Priscila Stfany da Silva Sales¹, Andressa Medeiros Santiso², Monalisa da Silva Godeiro³, Lilian Oliveira Lima⁴, Mario Orestes Aguirre González⁵

1, 2, 3, 4 e 5 *Creation* – Grupo de pesquisa em Inovação de Produtos e Processos para Energias Renováveis/ Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção/ UFRN

priscila.stfany.092@ufrn.edu.br¹; andressa.santiso.014@ufrn.edu.br²; monalisa.godeiro@ufrn.br³; xlilianoliveira@hotmail.com⁴; mario.gonzalez@ufrn.br⁵

RESUMO

A transição energética mundial para uma economia de baixo carbono vem impulsionando países a traçarem metas ambiciosas para implementação de fontes de energia renováveis em suas matrizes energéticas. Nesse contexto de descarbonização, destaca-se o papel da energia eólica *offshore*, fonte com alta capacidade de geração e economia de escala, com uma capacidade instalada atual de 75,2 GW e uma projeção de crescimento exponencial para 138 GW em 2028. O Brasil, com uma matriz elétrica predominantemente composta por fontes renováveis, como a Eólica *Onshore*, também possui grande potencial para geração de energia eólica *offshore*, vista como uma oportunidade para consolidar a transição energética e apoiar outros países para suas metas de descarbonização. Porém, junto a essa oportunidade, inúmeros desafios precisam ser superados, bem como boas práticas devem ser aprendidas. Um dos desafios é a segurança do trabalho, uma vez que, por se tratar de uma indústria ainda não conhecida no Brasil, os riscos inerentes às atividades executadas também são pouco conhecidos e a mitigação destes também. Por isso, faz-se necessária análise e o estudo aprofundados a respeito dos riscos laborais identificados no setor eólico *offshore*, bem como as possibilidades de garantia da segurança e da saúde dos trabalhadores, de modo a prevenir acidentes e implementar boas práticas de gestão de saúde e segurança. Assim, a pesquisa tem como objetivo identificar boas práticas no setor eólico *offshore* em outros países e entender como isso pode ser implementado no Brasil. Para atingir esse objetivo, a pesquisa seguiu 4 etapas: i) pesquisa teórica, ii) estudo de casos e iii) sistematização de dados e iv) proposta de boas práticas. O estudo de casos foi direcionado a a) plataformas de óleo e gás *offshore* no Brasil, e b) parques eólicos *offshore* em países com esse mercado desenvolvido e em desenvolvimento. Extraiu-se da análise dos resultados e das boas práticas identificadas, 06 pilares para a segurança do trabalho na implementação de parques eólicos *offshore* no Brasil. Os resultados, portanto, ratificam a necessidade de um sistema de gestão de segurança e saúde do trabalho no setor de eólica *offshore*, alertando para a importância de pesquisas e discussões nessa temática.

Palavras-chaves:

Eólica *offshore*; *safety culture*; segurança do trabalho; riscos ocupacionais.

ABSTRACT

The global energy transition to a low-carbon economy is driving countries to set ambitious targets for implementing renewable energy sources in their energy mix. In this decarbonization context, the role of offshore wind energy plays a crucial issue due to its high generation capacity and economies of scale. Currently, offshore wind energy has an installed capacity of 75.2 GW, with projections indicating exponential growth to 138 GW by 2028. With a power mix predominantly composed of renewable sources such as onshore wind energy, Brazil also has great potential for offshore wind energy generation. This is seen as an opportunity to consolidate the energy transition and support other countries in their decarbonization goals. However, along with this opportunity, numerous challenges need to be addressed, and good practices must be learned. One of the challenges is occupational safety. As a new industry in Brazil, the inherent risks of the activities and its mitigation measures are not well known yet. Therefore, a detailed analysis and in-depth study of the occupational risks identified in the offshore wind sector, as well as the possibilities for ensuring the safety and health of workers, are necessary to prevent accidents and implement good health and safety management practices. Thus, the research aims to identify best practices in the offshore wind sector and understand how it may apply in Brazil. To achieve this goal, the research followed four stages: i) theoretical research, ii) case studies, iii) data systematization, and iv) best practices proposal. The case studies were focused on a) offshore oil and gas platforms in Brazil, and b) offshore wind farms in countries with developed and developing markets. From the analysis of the results and identified best practices, six pillars for occupational safety in the implementation of offshore wind farms in Brazil were derived. The results, therefore, reaffirm the need for a health and safety management system in the offshore wind sector, highlighting the importance of research and discussions on this topic.

Keywords:

Offshore wind; safety culture; workplace safety; occupational risks.

1. INTRODUÇÃO

Em 2015, em Paris, os participantes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima concordaram em unir esforços para limitar o aumento da temperatura global a 2°C, ou até 1,5°C, até 2050 (IRENA, 2022). O governo brasileiro comprometeu-se em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 48% em 2025, com uma contribuição indicativa subsequente de redução de 53% em 2030, em relação aos níveis de emissões estimados para 2005 (BRASIL, 2023).

A eólica *offshore* tem se mostrado uma fonte chave para a atingir as metas de descarbonização dos países, contribuindo para transição energética global. O Brasil é um dos países que possuem potencial para desenvolver a tecnologia (WORLD BANK, 2019) com um potencial ao longo da costa de 697 GW

com um fator de capacidade de até 68%, em profundidades de até 50m e a 100m de altura (EPE, 2020). Considerado um mercado em fase de preparação para o desenvolvimento (GWEC, 2020), o país possui mais de 234 GW de intenções de requerimentos de licenciamento ambientais (IBAMA, 2024).

Ainda que considerada uma energia limpa e benéfica para o meio ambiente, não significa dizer que seja saudável e segura para os trabalhadores. Estes são constantemente expostos a perigos e desafios que podem resultar em fatalidades ou graves acidentes, durante as diversas fases de um projeto eólico, desde os testes e a produção de turbinas e componentes, ao transporte, instalação e manutenção do parque eólico no mar, que por si, é um ambiente sujeito a condições adversas (IRENA, 2014). A exemplo, em 2022, o caso de um navio eólico *offshore* que afundou em meio a uma tempestade, levando a óbito 4 membros e mais de 26 trabalhadores desaparecidos (SOUZA, 2022).

Tendo isso em vista, e apesar de sua relevância, os dados sobre doenças e acidentes relacionados com o trabalho no setor da energia eólica são muito escassos. A principal razão para essa falta de dados é o fato de se tratar de um setor relativamente novo, com poucos estudos sobre a exposição dos trabalhadores aos riscos (QUEIROZ, 2018). Os perigos existentes num parque eólico não são muito diferentes dos atualmente existentes em outros setores. Contudo, dadas as condições únicas e extremas em que essas adversidades surgem, a combinação desses perigos e a inexperiência dos trabalhadores no setor, podem resultar em desafios significativos para o controle e a gestão de riscos (EU-OSHA, 2013).

Nesse sentido, surge a questão que deu origem a pesquisa: **“Quais seriam as boas práticas para a segurança do trabalho nas atividades que envolvem a instalação de parques Eólicos Offshore no Brasil?”**. A partir desse questionamento, o objetivo do trabalho é identificar boas práticas no setor eólico *offshore* em outros países e entender como isso pode ser implementado no Brasil. Para atingir esse objetivo, o método da pesquisa seguiu quatro etapas: i) pesquisa teórica, ii) estudo de casos e iii) sistematização de dados e iv) proposta de boas práticas.

O artigo está dividido em 5 seções, a contar com a Introdução. Na seção 2 está exposta a Fundamentação Teórica, descrevendo as atividades *offshore* no Brasil, a relação com a segurança do trabalho e os acidentes de trabalho no setor *offshore*. Na seção 3 está o Método da Pesquisa. Na seção 4 estão descritos os Estudos de Caso acerca da Segurança do Trabalho, tanto nas plataformas de óleo e gás *offshore* no Brasil, quanto casos nos parques eólicos *offshore* dos países com mercado maduro. Na seção 5 estão explícitos os resultados e discussões. E na seção 6, as considerações finais e recomendações.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 As atividades *offshore* no Brasil

A exploração *offshore* teve início no final do século XIX, em águas ultrararas (*swallow water* – até 30 metros), de maneira e pouco científica. As dificuldades tecnológicas eram superadas empiricamente, por meio do método de tentativa e erro (*learning-by-trying*) e com o apoio de pesquisa e desenvolvimento (P&D) dedicado. O padrão tecnológico utilizado no segmento *onshore* era transferido para a exploração *offshore* (Neto, 2028). No Brasil, a exploração de petróleo *offshore* teve início em 1968, no Campo de Guaricema, na Bacia de Sergipe, utilizando uma plataforma rígida. Este evento marcou um grande marco nas atividades *offshore* do país.

Em 1997, diversos países assinaram o Protocolo de Kyoto, e nos anos 2000, intensificou-se a busca por energias limpas, renováveis, seguras e sustentáveis. Entre as fontes de energia renovável, a energia eólica tem se destacado e se consolidado como uma das fontes mais promissoras de produção de energia em larga escala (Silva, 2023). Diferente de países como o Reino Unido, que se destaca pelos numerosos parques eólicos *offshore* (marítimos) e possui uma política de expansão da geração *offshore* bem estabelecida (TOKE, 2011), a fonte energia eólica *offshore* ainda não é uma realidade no Brasil onde a geração de energia eólica está concentrada no contexto *onshore* (continental).

A costa brasileira apresenta um grande potencial para geração de energia eólica, estimado em 697 GW em profundidade de até 50m e a 100m de altura (EPE, 2020a). Apesar do potencial, o país ainda não dispõe de usinas eólicas *offshore* devido à falta de regulamentação do setor. No entanto, a fonte foi considerada pela primeira vez nas análises do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2029), com ressalva para o fato que a evolução da maturidade desta tecnologia a nível mundial e elevação de sua competitividade dependem diretamente do desenvolvimento de estudos técnico econômicos e socioambientais, bem como de avanços regulatórios no Brasil (MME; EPE, 2020).

Em 2020, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA) lançou o Termo de Referência (TR) Padrão para Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/Rima) de Complexos Eólicos Marítimos, com o objetivo de acelerar e melhorar as análises ambientais, reduzir a discricionariedade e a insegurança jurídica, garantindo maior proteção ambiental e atração de investidores. Com a publicação do TR, houve um aumento significativo na abertura de novos processos de licenciamento ambiental para projetos *offshore*, totalizando 97 projetos em abril de 2024 (IBAMA, 2024).

Em 2022, o Decreto nº 10.946 estabeleceu regras para o avanço dos parques eólicos *offshore* no Brasil, prevendo o aproveitamento de águas interiores de domínio da União, no mar territorial, na zona econômica exclusiva e na plataforma continental. No entanto, ainda há certa insuficiência na regulação atual para atender às necessidades do setor com segurança jurídica. Em 2021, o senador Jean Paul Prates protocolou o projeto de lei 576/2021, que regulamenta a autorização para instalação de projetos de geração de energia na costa brasileira, abrangendo eólica, solar e das marés, esperando-se que ao final de 2024 a estrutura regulatória para usinas eólicas *offshore* esteja definida, promovendo o desenvolvimento da indústria no país (BRASIL, 2021). De forma complementar, a EPE, visando contribuir para a construção da regulamentação do setor trouxe, em 2024, notas técnicas com recomendações para o contexto brasileiro (EPE, 2024).

2.2 A relação da segurança do trabalho e as atividades *offshore* no Brasil

No Brasil, a segurança do trabalho começa em 1919, com a Lei nº 3724 que trouxe as primeiras regulamentações sobre acidentes de trabalho no país. Em 1943, o presidente Getúlio Vargas instituiu a Consolidação das Leis do Trabalho (CLT), iniciando o processo de direitos trabalhistas. Em 1966, foi criada a FUNDACENTRO (Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho), que promoveu medidas de prevenção de acidentes. Em 1972, o governo federal criou a portaria nº 3237, que tornou obrigatórios os serviços médicos, de higiene e segurança em todas as empresas com 100 ou mais empregados (BITTENCOURT, 1998). Em 1978, ocorreu o grande marco da criação das Normas Regulamentadoras (NRs), que estabelecem obrigações, direitos e deveres para empregadores e trabalhadores, visando garantir um ambiente de trabalho seguro e saudável. As primeiras NRs foram publicadas pela Portaria MTb nº 3.214, de 8 de junho de 1978, e outras normas foram desenvolvidas ao

longo do tempo para assegurar a prevenção de acidentes e a saúde dos trabalhadores em diversos setores econômicos (BRASIL, 2020).

No segmento *Offshore* do Brasil, a NR-37 – Segurança e Saúde em Plataformas de Petróleo, foi editada pela Portaria MTb nº 1.186, em 20 de dezembro de 2018, e teve como base inicial para sua elaboração o Anexo II da Norma Regulamentadora NR-30 – Plataformas e Instalações de Apoio, editada pela Portaria SIT nº 183, de 11 de maio de 2010. O texto final aprovado pela CTPP tem 33 capítulos e 9 anexos e estabelece os requisitos mínimos de segurança, saúde, e condições de vivência no trabalho a bordo de plataformas de petróleo nas Águas Jurisdicionais Brasileiras – AJB (BRASIL, 2020).

2.3 Acidentes de trabalho no setor *Offshore*

As regulamentações de segurança *offshore* variam significativamente entre os países, refletindo diferentes contextos geográficos, industriais, tecnológicos e culturais. De acordo com o Relatório de Pesquisa do Reino Unido RR 1114/UK, foram registrados mais de 6.700 incidentes e informações técnicas sobre 3.700 unidades *offshore* no período de 2008 a 2012 (HARE et al., 2017). Dentre os acidentes graves identificados os eventos que apresentaram maior frequência foram: 1) liberação de hidrocarboneto, 2) incêndios e explosão, 3) condições climáticas severas, 4) impactos de aeronaves, 5) queda de carga/objetos, 6) impacto de embarcações, 7) falha estrutural, 8) condições inseguras, 9) riscos de transporte e fugas, e 10) evacuação e resgate em caso de atendimento a emergências.

No Brasil, segundo o Relatório Anual de Segurança Operacional das atividades de exploração e produção de petróleo e gás natural, foram recebidos em 2022, 2.410 comunicados de incidentes em instalações marítimas, onde as principais tipologias de acidentes mais comunicados no ano foram: 1) queda de objetos, 2) princípios de incêndios, 3) descarga de óleo, e 4) consequências de incidentes operacionais e ferimentos. Nas plataformas de produção e poços marítimos foram comunicados 1.244 incidentes, correspondendo a cerca de 82% do total de incidentes *offshore* comunicados. Os demais incidentes são relacionados a outras instalações, como sondas marítimas de perfuração, sistemas submarinos e embarcações de apoio (ANP, 2022).

Covil e Smith, 2002, ressaltam que a maior frequência de acidentes acontece com força de trabalho terceirizada, podendo estar relacionada, em geral, por estar distribuídos em atividades operacionais de maior risco nas unidades produtiva, tais como as ocupações de técnico de manutenção e de técnico de operação. Alguns dos fatores que justificam a maior ocorrência de acidentes de trabalho com os terceirizados, além do vínculo empregatício mais frágil, são as jornadas de trabalho mais extenuantes e com períodos de repouso mais curtos (normalmente, permanecem 14 dias em terra, enquanto os próprios, 21 dias); menor exigência de treinamento e reciclagem frente aos trabalhadores próprios; falta de experiência em determinadas instalações e a maior exposição às situações de riscos das unidades operacionais, tendo em vista serem usualmente os executores das tarefas na área industrial (GUIDA, 2020).

O ambiente físico de trabalho em plataformas de óleo e gás *offshore* inclui ruído, vibração, seca, calor, vapor, substâncias inflamáveis perigosas e ergonomia, onde tais riscos podem ocasionar danos, devendo ser reduzidos através de medidas apropriadas (HOSSAIN, 2022). Figueiredo (2016), também destaca que a segurança nas atividades em sistemas de alta complexidade exige que o ambiente de trabalho seja propício à densidade do trabalho mental e à qualidade de relacionamentos interpessoais

concretizados pela confiança e sentimento de pertencimento onde o coletivo estejam integrados a percepção de respeito a vida e a integridade física e mental dos que as executam.

Com isso, fica evidente que o trabalhador não está exposto somente aos riscos ocupacionais descritos em sua atividade, mas também à interação dos riscos de diversos processos que ocorrem simultaneamente em um mesmo ambiente de trabalho. Alguns aspectos cruciais para um regime de segurança efetivo nas explorações *offshore* são (MCANDREWS, 2011):

- i. Regulamentação baseada em desempenho associada à regulamentação prescritiva;
- ii. Consideração de aspectos tecnológicos, organizacionais e pessoais;
- iii. Funções e responsabilidades claramente definidas;
- iv. Aplicação de gerenciamento de riscos: identificação, redução e controle de riscos;
- v. Monitoramento de desempenho compartilhado;
- vi. Viabilidade econômica e tecnológica;
- vii. Equilíbrio entre risco, controle e circunstâncias.

3. MÉTODO DA PESQUISA

Para garantir a validação e replicação, uma pesquisa deve ser classificada quanto ao gênero, objetivo, abordagem e método. Este estudo é caracterizado como pesquisa aplicada, já que sua finalidade é identificar o cenário internacional relacionado às práticas em segurança do trabalho em parques eólicos *offshore*. Quanto à classificação dos objetivos, o estudo possui características exploratórias, por meio da necessidade de um levantamento bibliográfico e documental, e descritivas. Por conseguinte, a pesquisa possui abordagem qualitativa, visto que os objetos de estudo foram investigados de forma teórica. O procedimento do estudo contemplou quatro etapas: i) pesquisa teórica, ii) estudo de casos e iii) sistematização de dados e iv) proposta de boas práticas.

A pesquisa teórica englobou uma revisão bibliográfica, utilizando como tema (a) atividades *offshore* no Brasil; (b) a relação da segurança do trabalho e as atividades *offshore* no Brasil; e (c) acidentes de trabalho no setor *offshore*. A pesquisa foi realizada por meio de artigos científicos, obtidos por meio de buscas no *Periódico Capes* e relatórios técnicos divulgados por agências e empresas do setor. O estudo de casos contemplou dois setores: i) segurança do trabalho em plataformas de O&G *offshore* no Brasil, e ii) segurança do trabalho em parques eólicos *offshore* com mercado eólico *offshore* desenvolvido como Dinamarca, Alemanha, Reino Unido e em desenvolvimento, como Estados Unidos. O estudo de caso permitiu que fossem identificadas boas práticas em projetos executados no mercado internacional que podem ser replicados no país, permitindo a otimização na segurança de parques eólicos *offshore* e reduzindo riscos e incidentes aplicados aos trabalhadores, além de identificar os aprendizados no setor de O&G já maduro no Brasil e o que pode ser aproveitado para aplicação de atividades operacionais em ambientes marítimos.

4. ESTUDO DE CASOS

4.1 Segurança do trabalho em plataformas *offshore* no Brasil

A indústria do petróleo sempre esteve atenta à segurança de suas operações, principalmente por lidar com materiais inflamáveis com risco de acidentes graves considerável. No caso de plataformas marítimas de petróleo, o risco se torna ainda maior, por se tratar de um ambiente isolado e distante do

suporte em terra. Os acidentes fatais mais frequentes nesse ambiente costumam ocorrer tanto no trajeto até a plataforma (acidentes de helicóptero), quanto no interior das plataformas de petróleo durante a perfuração de poços ou em atividades de manutenção destes (AZEVEDO, 2013).

Quando há entrada de fluidos indesejáveis – em geral óleo ou gás – da formação para o interior do poço, esses fluidos podem chegar à superfície (*blowout*), que pode ser considerado o mais grave tipo de acidente em poços de petróleo. Um *blowout* pode custar muito caro, e o prejuízo, além de financeiro, se estende ao meio ambiente. Para assegurar a saúde do trabalho e segurança das operações, é preciso respeitar a legislação vigente no país (AZEVEDO, 2013).

Ao longo dos anos, os acidentes no trabalho em plataformas de petróleo foram culminando em alterações da Política de Saúde e Segurança (PSS) (GUIDA, 2020). O acidente com a P-36, ocorrido em 15 de março de 2001, é um daqueles eventos que integra a galeria dos grandes desastres internacionais da indústria do petróleo, que resultou em 11 mortes, perda total da unidade, cuja produção a plena carga seria de 180 mil barris por dia, e um prejuízo estimado em um bilhão de Reais (FIGUEIREDO; ALVEZ; ADAMS, 2018). Foi considerado um marco para as principais mudanças no PSS, no qual inúmeras ações e programas foram implementados e os investimentos na área de saúde e segurança aumentaram substancialmente (GUIDA, 2020).

De acordo com a análise do relatório da Agência Nacional de Petróleo e da Diretoria de Portos e Costas da Marinha do Brasil, concluiu-se que o acidente ocorreu por não conformidade quanto aos procedimentos operacionais, de manutenção e de projeto. A seguir, na Tabela 1, estão descritos os programas e iniciativas criados a partir desse ocorrido na empresa.

Tabela 1: Cronologia de programas PSS criados

Ano	Programa	Descrição
2001	PEGASO	Primeiro programa de gestão de risco, com o intuito de transformar e recuperar a reputação, focando em projetos de integridade e automação da rede de dutos, redução dos resíduos e atuação proativa na gestão de segurança e meio ambiente.
2001	Política Corporativa de Segurança, Meio Ambiente e Saúde (PCSMS)	Tornar-se referência internacional no setor de petróleo e gás. Neste período todas as Unidades de Negócios obtiveram certificações relacionadas ao meio ambiente, segurança e saúde ocupacional: ISO 14001, BS 8800, OSHA 18001.
2001	Avaliação de Gestão de SMS	Ferramenta para aferir o grau de aderência às Diretrizes de SMS e ao Programa de Segurança de Processo (PSP)
2002-2006	PSP	Implantação de diretrizes para assegurar uma gestão eficiente de SMS, controlar ou minimizar os riscos pessoais, ambientais e materiais, alcançar padrões internacionais de SMS, e contribuir para a educação e a conscientização da força de trabalho em relação à percepção de risco.
2006	Premiações	Índice Dow Jones, Sustentabilidade; "Top 5", Goldman Sachs.
2007	Projeto Excelência em SMS	Prioridade na saúde dos trabalhadores e na prevenção dos acidentes, a partir das iniciativas: "Gestão integrada de SMS"; "Ecoeficiência de operações e produtos"; "Prevenção de acidentes, incidentes e desvios"; "Saúde dos trabalhadores"; "Prontidão para situações de emergência-contingência"; e "Minimização de riscos e passivos ainda existentes".

2009	Ações em Segurança de Processo (SP)	Atender as exigências dos órgãos reguladores e elegendo-se como foco de atuação a identificação dos riscos no processo e a prevenção das graves ocorrências operacionais.
2014	Programa de Melhoria Contínua (PMC)	Dez regras de ouro: Permissão de Trabalho; Isolamento de Energia; Trabalho em Altura; Espaço Confinado; Atmosfera Explosiva; Posicionamento Seguro; Equipamento de Proteção Individual; Atenção às Mudanças; Segurança no Trânsito e Álcool e Outras Drogas.
2016	Revisão do PGSMS e lançamento do Programa “Compromisso com a Vida”,	Prevê para o período de 2017-2021 a redução de 36% da taxa de acidentes. Pilares: Obrigação de Fazer, Sistema de Consequência, Reforço de Segurança de Processo e Ações Integradas, e uma das ações prioritárias é a implementação das regras de ouro.

Fonte: adaptado de Guida (2001)

É necessário reconhecer que somente os procedimentos, normas e prescrições e o saber científico, o que é denominado de “segurança normatizada”, apesar de importantes, não são suficientes para eliminar ou minimizar acidentes. Faz-se necessário também a “segurança em ação”, relacionada à capacidade dos agentes de dar respostas em tempo real às ocorrências por meio da adaptação dos procedimentos às especificidades da situação.

Outro caso de acidente do trabalho em ambiente *offshore* ocorreu em 2015, na Cidade de São Mateus, com a explosão na Casa de Bombas do navio-plataforma FPSO (*Floating, Production, Storage and Offloading*), uma unidade flutuante de produção, armazenagem e transferência de óleo e gás. Neste caso, foram investigadas as causas e as possíveis falhas que levaram a ocorrência dessa explosão que foi fatal. Foi constatado que a empresa que foi contratada para fornecer esse navio-plataforma seguia as diretrizes de saúde e segurança, com a identificação de perigos; estudos de segurança; análise e gerenciamento de riscos; acompanhamento gerencial da implementação do Sistema de Gerenciamento da Segurança Operacional do FPSO CDSM, entre outras normatizações (ADAMS, 2015; ANP, 2015).

Entretanto, diversas causas foram elencadas e algumas delas relacionadas com a conduta do operador ou do trabalho desempenhado pela equipe responsável, podendo-se inferir que a “segurança em ação” pode ter sido falha. Um relatório investigativo da ANP (2015) relata os fatores causais que podem justificar a ocorrência, bem como as recomendações as quais empresas, terceirizados, fornecedores e toda a cadeia de valor de uma atividade de exploração *offshore* estejam aptos a fazer para que se evite novas ocorrências desse mesmo problema. Na Tabela 2 estão elencadas as principais causas raiz e recomendações correlacionadas.

Tabela 2: Principais causas raiz do problema e recomendações

Causas raiz	Recomendações
Gerenciamento de mudanças não realizado;	✓ Garantir o gerenciamento de mudanças em todas as fases do ciclo de vida de uma unidade;
Falta de revisão de riscos;	✓ Garantir a disponibilidade das informações para o cumprimento de normas e procedimentos;
Passagem de serviço inadequada e Comunicação inadequada entre turnos;	✓ Revisar os estudos de risco da plataforma, antes do início da operação, com a participação das equipes de projeto e de operação;
Documentos desatualizados;	✓ Planejar ações, anteriormente à implementação de mudanças temporárias;
Degradação da equipe de marinha do FPSO CDSM, pela ausência dos superintendentes, ausência de tutoria/acompanhamento, ausência da função de supervisão;	✓ Estabelecer procedimento escrito de passagem de serviço que garanta, no mínimo, formato do registro escrito, bem

Dimensionamento inadequado do programa de treinamento;	como o acesso e conhecimento de mudanças, isolamentos e condições operacionais dos sistemas afetos a cada função, antes de assumir o trabalho a bordo;
Pessoas com mesmo cargo desempenhando funções distintas;	✓ Criar mecanismos para a atualização dos sistemas de controle de documentação técnica;
Falta de treinamento em procedimentos operacionais;	✓ Identificar, estabelecer e implementar capacitação teórica e prática;
Procedimento desatualizado e indisponível;	✓ Implementar programa de treinamento contínuo e processo de tutoria;
Falha na disponibilização de recursos;	✓ Estabelecer objetivamente requisitos para a garantia da capacitação mínima para cada cargo;
Falha na implementação de ações corretivas na Marinha;	✓ Contemplar em planos de manutenção e com periodicidade definida, inspeção e teste de todos os sistemas de alívio de pressão, alarme e intertravamento;
Falta de alarme de pressão alta na descarga da bomba;	✓ Conscientizar periodicamente pessoal de bordo sobre os riscos;
Falha no controle de peças sobressalente e no controle de informações;	✓ Definir no plano de resposta à emergência os recursos materiais e humanos disponíveis.
Falta de instruções claras no procedimento de resposta à emergência, com procedimento incompleto e inadequado.	

Fonte: adaptado de ANP (2015)

Portanto, embora o risco de ocorrência de acidentes em ambiente *offshore* seja significativamente alto, há inúmeras recomendações e boas práticas que podem ser seguidas para mitigar o impacto do acidente e até mesmo preveni-lo. Essas ações e programas devem partir principalmente da empresa, que deve ser responsável por quem está prestando os serviços, bem como da administração das agências regulatórias, e ainda dependem dos envolvidos na operação, que devem ter a consciência e o treinamento técnico, teórico e prático de cada atividade desempenhada. Ao mesmo tempo, é evidente que a indústria, especialmente *offshore*, precisa enfrentar importantes desafios para melhorar na: seleção de pessoas; treinamento para condições de trabalho normais, de emergência e fora da rotina (AZEVEDO, 2013).

Além disso, é imprescindível implementar as técnicas de gerenciamento de risco dentro da indústria e manutenção de organizações de alta confiabilidade, com regulamentação de confiança e flexível, que atenda eficientemente a mudanças e novos tipos de acidentes relacionados a novos desafios ou novas tecnologias na exploração em águas profundas, pois uma regulamentação mais flexível baseada em desempenho pode ser mais eficiente em áreas operacionais com rápidas mudanças tecnológicas e grandes desafios (AZEVEDO, 2013).

4.2 Segurança do trabalho em parques eólicos *offshore*

Com o desenvolvimento da indústria eólica *offshore*, a experiência vem sendo adquirida em diversas áreas. Na área de segurança operacional percebe-se uma taxa de incidentes documentados mais elevada quando comparada à indústria de óleo e gás (OZKAN, 2023). Dado que se trata de uma indústria relativamente nova, informações relacionadas a incidentes em parques eólicos *offshore* é dispersa e carece de detalhes. Nesse contexto, lições aprendidas com a experiência de países com mercado eólico *offshore* desenvolvido como Dinamarca, Alemanha, Reino Unido e em desenvolvimento, como Estados Unidos, permite a otimização na segurança de parques eólicos *offshore*, reduzindo riscos e incidentes aplicados aos trabalhadores (SINTEF, 2011).

Dentre os acidentes ocupacionais relacionados a parques eólicos *offshore* mapeados, os principais se destacam: 1) construção e grandes reparos, em particular operações de içamento e operação de embarcações de construção *jack-up*, que se tornam mais desafiadoras conforme a tecnologia de

turbinas avança em tamanho e dimensões; e 2) operação de manutenção e reparos menores, trabalho em altura e resposta a emergências (SINTEF, 2011).

No Reino Unido e Alemanha altos índices de acidentes do trabalho foram registrados em parques eólicos *offshore*, tendo como um dos fatores contribuintes, a falta de regulamentação aplicada a operação. De forma a promover o desenvolvimento econômico e construção dos parques eólicos *offshore*, os países não detinham de regulamentações específicas para a atividade o que provocou o alto índice de acidentes. Os Estados Unidos, como um novo mercado, vêm traçando estratégias para reduzir estes índices com base em boas práticas do setor (OZKAN, 2023).

Diante das lições aprendidas se destacam algumas recomendações para novos mercados em gestão de segurança em parques eólicos *offshore*, conforme descrito na Tabela 3.

Tabela 3: Recomendações de gestão de segurança para parques eólicos *offshore*

Causa Raiz	Recomendações
Medo de retaliação por relatar perigos.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Criação de ambiente colaborativo e acolhedor para sugestões de técnicos e operadores, além de incentivos e recompensas para que relatem os perigos e defeitos do sistema para correção pela gerencia. Nos EUA, os sindicatos cobriram custos para que seus membros realizassem capacitações pela Associação Eólica Global (GWO), trazendo uma conscientização sobre os perigos encontrados ao trabalhar na indústria eólica e como controlar e mitigar esses perigos. A GWO é uma organização sem fins lucrativos criada por fabricantes e operadores de turbinas eólicas para capacitação de técnicos em primeiros socorros, conscientização sobre incêndios, trabalho em altura, manuseio manual e, para o ambiente <i>offshore</i>, um módulo de sobrevivência no mar.
Falta de participação de técnicos nas regulamentações	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Integração de técnicos e operadores no desenvolvimento de regulamentações específicas do setor. Nos EUA, o Bureau of Safety and Environmental Enforcement (BSEE) é o principal regulador da indústria de energia eólica <i>offshore</i>. O BSEE atua voltada para óleo e gás <i>offshore</i>, com novos padrões sendo desenvolvidos para o setor eólico <i>offshore</i>.
Incidente em queda de operador durante uma transferência de uma peça de transição (TP) para uma embarcação de transferência de tripulação (CTV).	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Monitoramento meteorológico contínuo; ✓ Reavaliação das operações durante a deterioração do tempo; ✓ Adesão aos protocolos de descida controlada.
Necessidade de adoção de áreas de segurança para garantir melhores condições durante as atividades de construção da usina.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Guarda costeira dos EUA adotam a delimitação de 500 <i>yards</i> ao redor de cada turbina conforme experiência adotada no Reino Unido (500m) durante as atividades de construção e descomissionamento, tendo essa área reduzida para 50m nas atividades de O&M.
Incidentes em operações de mergulho Exemplo: Alpha Ventus, Bard e Riffgat (Alemanha), onde mergulhadores sofreram danos e falecimentos ao desempenharem suas atividades pela falta de oxigênio.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inspeção prévia de equipamento; ✓ Inspeção prévia de composição do ar/gás; ✓ Monitoramento de pressão diferencial (quando os níveis de água variam de um lado para outro de uma barreira ou limite); ✓ Checagem de condições de mergulho; ✓ Monitoramento meteorológico contínuo; ✓ Realização de treinamento de operadores, acompanhados por supervisão e monitoramento de mergulho após capacitação.

<p>Incidentes em operações de içamento. Exemplo: Beatrice (Reino Unido), no qual um empregador teve ferimentos ao ser atingido pelo balanço uma estrutura de 15 toneladas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Previsão de potencial para carga de balanço; ✓ Utilização de sistemas de orientação com base em câmeras; ✓ Limpeza e remoção de itens soltos antes do içamento; ✓ Verificação da resistência da estrutura a ser içada, incluindo a resistência dos pontos de içamento ✓ Verificação da capacidade do guindaste; ✓ Avaliações de risco, estudos HAZOP/HAZID envolvendo pessoal-chave de todas as partes relevantes ✓ Sistemas de amortecimento ✓ Fatores de utilização e segurança de acordo com padrões internacionais ✓ Ciclo de vida do equipamento e inspeção, em particular para içamentos repetitivos, precisam ser definidos ✓ O operador que prende ou solta a carga deve dar sua autorização antes que o equipamento de içamento seja operado. Sempre que possível, ganchos e outros dispositivos semelhantes usados para içamento devem ter travas de segurança instaladas ou serem moldados para evitar o deslocamento acidental da eslinga. ✓ A carga deve ser içada ao longo da linha prumada para evitar movimentos oscilantes da carga e cargas de choque (laterais) no equipamento de içamento. Qualquer içamento fora do centro de gravidade deve ser minimizado ou evitado sempre que possível. ✓ O equipamento de içamento não deve ser usado ao ar livre onde as condições climáticas possam afetar a integridade do equipamento ou expor as pessoas ao perigo. ✓ Todas as etapas descritas no Plano de Içamento devem ser seguidas para minimizar os riscos identificados durante o planejamento. ✓ Onde dois ou mais itens de equipamento de içamento são usados, eles ou suas cargas devem ser impedidos de entrar em contato uns com os outros. Isso exigirá coordenação contínua entre as diferentes equipes de içamento. ✓ O sinal de mão de PARADA DE EMERGÊNCIA pode ser usado por qualquer pessoa envolvida na operação de içamento a qualquer momento, se considerar a operação insegura. Todas as pessoas devem comunicar quaisquer preocupações de segurança ao responsável no local (ou seja, o Supervisor de Içamento), que deverá então agir de acordo com sua compreensão do processo. ✓ Caso o responsável considere haver qualquer ameaça à saúde ou segurança do pessoal, ao meio ambiente ou à integridade da planta ou da carga, um procedimento local definido de PARADA DE TRABALHO deve ser seguido.
<p>Incidente ao acessar a nacelle para instalação de turbina para conexão do hub com defeitos no plugue e fiação exposta, causando choque elétrico.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Os cabos devem ser enrolados e suspensos em pontos de ancoragem na nacelle. ✓ Realizar verificações visuais antes e depois do trabalho. ✓ Garantir que os plugues e cabos estejam livres antes da rotação da nacelle. ✓ Implementar medidas de mitigação de gestão de cabos para evitar que os cabos entrem em contato com os parafusos de rotação e prevenir emaranhamentos.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O número de incidentes em 2023 demonstrou um aumento de 94% em comparação ao ano anterior, saindo de 867 para 1.689. No entanto, a taxa de incidência total (TRIR) reduziu o que indica que o aumento nos casos se deve ao possível aumento de projetos entrando na fase de construção. Esses números ressaltam a importância do monitoramento e mitigação de riscos ocupacionais no setor e a adoção de altos padrões de regulamentação e segurança (G+, 2024).

Cada país possui seu próprio método de organização e regulação de suas atividades, podendo haver diferenças nas abordagens regulatórias entre eles, ainda que com mesmo objetivo principal: garantir a segurança dos trabalhadores, proteger o meio ambiente e assegurar a conformidade com padrões de operação seguros.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nas lições aprendidas provenientes da análise da literatura e dos estudos de casos apresentados, foi possível elencar 6 (seis) pilares com boas práticas, ilustradas na Figura 1. As boas

práticas propostas indicam pilares importantes para o setor da segurança do trabalho na implementação de parques eólicos *offshore* no Brasil.

Figura 1: Boas práticas para segurança do trabalho em parques eólicos *offshore*



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

A segurança do trabalho busca eliminar ou mitigar riscos existentes nas atividades laborais, visando à preservação da saúde e segurança dos trabalhadores expostos a agentes de risco. Para regular essas práticas de prevenção, há normas regulamentadoras e órgãos que se ligam a essas boas práticas de prevenção. No Brasil, as atividades *offshore* em plataformas já demonstram solidez, com regulamentação, tecnologias e conhecimento científico que embasam as ações de prevenção de acidentes. No entanto, a eólica *offshore* ainda é incipiente no país, sem muitos estudos associados e sem equiparação com outras atividades existentes.

Os estudos de casos demonstram que as atividades no sistema *offshore* são o que compõe, atualmente o chamado sistema sociotécnico complexo, com muitas variáveis associadas para que seja montada uma modelagem que sirva de parâmetro para indicações de boas práticas de medidas de prevenção. Essas variáveis são organizacional, tecnológico, ambiental e individual.

Em resposta ao objetivo do artigo, foram identificados 6 (seis) pilares de boas práticas para a segurança do trabalho na implementação de parques eólicos *offshore* no Brasil, sendo eles: 1) Segurança Ocupacional; 2) Segurança operacional; 3) Segurança de processos; 4) Regulamentação; 5) Capacitação e; 6) Programas técnicos. Cada pilar traz itens específicos para execução, mas não limitados a um único

pilar, pois todos estão interligados. Como por exemplo, a segurança operacional, na qual ao elaborar plano e procedimentos operacionais, interliga-se com a capacitação, pois a força de trabalho deve ser treinada. Outro exemplo é a segurança ocupacional, que ao implementar um sistema de gestão de segurança no trabalho, comunica-se com as regulamentações e programas técnicos, sendo assim, cada pilar é fundamental para a construção de um todo mais seguro.

Com o estudo fica clara a importância de se estabelecer uma gestão de segurança do trabalho, contendo boas práticas direcionadas para as atividades envolvidas com a eólica *offshore*, dado o histórico de acidentes no país e a trajetória percorrida para inferir uma cultura de segurança legalmente estruturada. Para estudos futuros recomenda-se associar cada etapa das atividades presentes em cada fase do setor eólico *offshore*, desde a implementação do parque, manutenções e descomissionamento. A análise de cada etapa irá ilustrar os cenários de riscos, fazendo com que possa ocorrer a inferências das melhores práticas de prevenção de acidentes, em cada uma das fases do ciclo de vida.

REFERÊNCIAS

ADAMS, R. N. Saúde e segurança do trabalho em plataformas do setor offshore: o caso do acidente do FPSO cidade de São Mateus / Ricardo Nunes Adams. – Niterói, RJ : [s.n.], 2015.

Agência Europeia para a Segurança e Saúde no Trabalho (EU-OSHA), **Green jobs and occupational safety and health: Foresight on new and emerging risks associated with new technologies by 2020**, 2013b. Disponível em: <https://osha.europa.eu/en/publications/reports/green-jobs-foresight-newemerging-risks-technologies/view>.

Agência Internacional De Energias Renováveis (IRENA). **REthinking Energy: Towards a new power system**, Abu Dhabi, 2014. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2014/Sep/REthinking-Energy-Towards-a-new-power-system>. Acesso em 08 jul. 2024

Agência Internacional De Energias Renováveis (IRENA). **WORLD ENERGY TRANSITIONS OUTLOOK 2022: 1.5°C Pathway**. Abu Dhabi: IRENA, 2022. Disponível em: [irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf](https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf). Acesso em: 07 jul. 2024

ANP. Superintendência de Segurança Operacional e Meio Ambiente – SSM. **Relatório de Investigação do incidente de explosão ocorrido em 11/02/2015 no FPSO Cidade de São Mateus**, 2015.

AZEVEDO, R. C. **Segurança do trabalho em plataformas de petróleo: situação atual, tendências e perspectivas** / Ricardo Cabral de Azevedo. - São Paulo, SP : [s.n.], 2013.

BITTENCOURT, C.M. **Doenças do Trabalho e o exercício da enfermagem**. Salvador, 1998. Dissertação (Mestrado)-Escola de Enfermagem: Universidade Federal da Bahia.

BRASIL. **PL 576-21: Autorizações para aproveitamento de potencial energético offshore**, 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Marina anuncia na ONU correção da meta climática brasileira**. [Brasília] Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 21 set. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/marina-anuncia-na-onu-correcao-da-meta-climatica-brasileira>. Acesso em: 08 de julho de 2024.

BRASIL. Ministério do Trabalho e emprego. Normas Regulamentadoras NR. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao-do-trabalho/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/normas-regulamentadoras-nrs>. Acesso em: 08 de julho de 2024.

COVIL M., SMITH, D. **Transportation Fatalities: An Industry Problem?** SPE International Conference on Health, Safety and Environment in Oil and Gas Exploration and Production [Internet], 2002. p.1102-1105.

DANIELLOU, F., SIMARD, M., BOISSIÈRES, I. **Fatores Humanos e Organizacionais da Segurança Industrial: um estado da arte**, 2010. Número 2013-07 dos Cadernos da Segurança Industrial, ICSI, Toulouse, França (ISSN 2100-3874). Disponível em: <http://www.icsi-eu.org>. Acesso em: 07 jul. 2024

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Roadmap Eólica Offshore Brasil. Perspectivas para a energia eólica marítima. p. 141, 2020.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Cessão de áreas para Geração Eólica Offshore: Considerações sobre valor devido à União e área máxima a ser cedida. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/cessao-de-areas-para-geracao-eolica-offshore-consideracoes-sobre-valor-devido-a-uniao-e-area-maxima-a-ser-cedida>. Acesso em: 06 jul. 2024.

FIGUEIREDO, M. **A face oculta do ouro negro: trabalho, saúde e segurança na indústria petrolífera offshore da Bacia de Campos**. Niterói: EDUFF; 2016.

FIGUEIREDO, M. G.; ALVAREZ, D.; ADAMS, R. **O acidente da plataforma de petróleo P-36 revisitado 15 anos depois: da gestão de situações incidentais e acidentais aos fatores organizacionais**. Caderno de Saúde Pública -CSP, 2018.

G+ Global Offshore Wind Health and Safety Organisation. **2023 incident data report**, 2024.

G+ Global Offshore Wind Health and Safety Organisation. **Good practice guideline: Working at height in the offshore wind industry**, 2018. Disponível em: https://www.gplusoffshorewind.com/__data/assets/pdf_file/0010/633556/Work-at-Height-Guidelines-2nd-Edition-B31jk-web-version.pdf. Acesso em: 06 jul. 2024.

GUIDA, H. F. S., FIGUEIREDO, M. G., HENNINGTON, E. A. **Acidentes de trabalho fatais em empresa brasileira de petróleo e gás: análise da política de saúde e segurança dos trabalhadores**, 2020. DOI: 10.1590/1413-81232020255.34942019.

HARE, J., GOFF, R., BURRELL, G., MCGILLIVRAY, A. **Offshore accident and failure frequency data sources - review and recommendations**, 2017. Health and Safety Executive. Harpur Hill, Buxton, Derbyshire SK17 9JN. Disponível em: <https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20230103153025/https://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr1114.htm>. Acesso em: 06 jul. 2024.

HOSSAIN, N., HOWLADAR, F. Risk Perception and Safety Analysis on Petroleum Production System of Three Gas Fields in Bangladesh, 2022. **Journal of Safety Science and Resilience**, v.3, 4, p. 362-371. Doi: 10.1016/j.jnlssr.2022.08.003.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, (IBAMA). **Projetos com processos de licenciamento ambiental abertos no IBAMA**. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/arquivos/20240507_Usinas_Eolicas_Offshore.pdf. Acesso em: 05 jul. 2024

Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP). **Nota Técnica - Eólicas Offshore**. 2020. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2023/03/nt-eolicas-offshore-2023.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2024

MCANDREWS, K. L. 2011. **Consequences of Macondo: A Summary of Recently Proposed and Enacted Changes. U.S. Offshore Drilling Safety and Environmental Regulation**. Society of Petroleum Engineers, p. 9.

NETO, J. B. O.; SHIMA, W. T. **Trajetórias tecnológicas no segmento offshore: ambiente e oportunidades**. Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Econômico, Paraná/BR, 2008.

OZKAN, D. S. **Worker Safety in Offshore Wind as a Door for Sociotechnical Engineering Education**, 2023.

QUEIROZ, M. A. **Análise de riscos em parques eólicos: um estudo de caso**. 2017. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

SANTESTEVAN, W. H.; PEYERL, D.; D'AQUINO, C. A. **Possibilidades e Desafios Para Inserção Da Geração Eólica Offshore No Brasil**. Revista Brasileira de Energia, v.27, 4, 4º Trimestre de 2021.

SILVA, J. A. Energia eólica no Brasil - Avanços e desafios. Revista Princípios, nº 167, MAIO/AGO. 2023.

SINTEF. **HSE challenges related to offshore renewable energy**, 2011. Disponível em: https://www.sintef.no/globalassets/upload/teknologi_og_samfunn/sikkerhet-og-palitelighet/final-report-hse-challenges-offshore-renewable-energy.pdf. Acesso em: 05 jul. 2024

SOUZA, D. **Desastre urgente: Navio eólico offshore afunda com tempestade deixando mais de 26 desaparecidos e mortos na China**, 2022. Disponível em: <https://navalportoestaleiro.com/desastre-urgente-navio-eolico-offshore-afunda-com-tempestade-deixando-mais-de-26-desaparecidos-e-mortos-na-china/>. Acesso em: 05 jul. 2024

TOKE, D. The UK offshore wind power programme: A sea-change in UK energy policy. Energy Policy, v. 39, 2, pp. 526–534, 2011.

WEBSTER, J., CABEÇAS, J. M. M., KUHL, K., LIDDLE, M., ELLWOOD, P., SMITH, P., GERVAIS, R., BRADBROOK, S. D., VAANANEN, V. **Occupational safety and health in the wind energy sector** - European Risk Observatory. Publications Office of the European Union, 2013. Doi: 10.2802/86555.

Potencialidades de Operação Híbrida de Plataformas FPSO com Geração Eólica Offshore e Combinação de Eletrólise e Célula a Combustível PEMFC

Giovanni A. Marcolin¹ Flávio A. Becon Lemos¹ Fausto B. Libano²

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica¹

Departamento de Engenharia Elétrica ²

giovanni.marcolin@ufrgs.br, flavio.lemos@ufrgs.br, fausto.libano@ufrgs.br

RESUMO

A utilização de petróleo e gás ainda continuará a ser um dos principais pilares energéticos nos próximos anos. Entretanto, a sua produção, através da extração e processamento em plataformas, como as realizadas através de FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), pode ter o impacto minimizado na emissão de poluentes relacionados ao aquecimento global, contribuindo para uma transição energética sustentável. Uma das formas de realizar isso é a utilização de geração eólica offshore para suprir de forma complementar parte da demanda exigida pelos processos de extração e processamento. Este artigo analisa esta opção do ponto de vista da estabilidade do sistema elétrico, composto por uma usina eólica offshore com Gerador de Ímãs Permanentes (PMSG - *Permanent Magnet Synchronous Generator*), representado por seu modelo WECC equivalente, conectado a um sistema coletor, que alimenta um arranjo de eletrolisador/célula a combustível de Membrana Polimérica Trocadora de Prótons (PEMFC - *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) e um conjunto de cargas estáticas e dinâmicas que representam a demanda da FPSO. A geração na FPSO é realizada por geradores síncronos alimentados por turbinas a gás. Em momentos de sobra de energia eólica, é realizada a eletrólise da água para a produção de hidrogênio e, quando necessário, o hidrogênio é convertido em energia através da célula a combustível, para suprir a demanda, ou auxiliar o sistema transitoriamente. Para as simulações foi utilizado o software PowerFactory DIGSILENT e avaliado o comportamento da estabilidade angular, de tensão e frequência.

Palavras-chaves:

Geração Eólica Offshore, Célula a Combustível PEMFC; Eletrólise; Estabilidade de Sistemas Elétricos; Operação de Sistemas Elétricos; FPSO.

ABSTRACT

The use of oil and gas will remain a cornerstone of global energy in the years ahead. However, its production, through local extraction and processing on platforms like FPSO - *Floating Production Storage and Offloading*), can be managed to minimize emissions of pollutants related to global warming, contributing to a sustainable energy transition. One approach involves integrating offshore wind power to partially meet the energy demands of extraction and processing operations. This paper analyses this option with a focus on electrical system stability. It is used an electrical system composed of an offshore wind farm equipped with Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG) modelled using the WECC equivalent, associated to a collector system, which is connected to a FPSO to supply energy to electrolyser/proton exchange polymer membrane fuel cell (PEMFC) arrangement, along with various static and dynamic loads that represent the FPSO's demand. Generation at the FPSO is carried out by synchronous generators driven by gas turbines. During periods of excess wind power, surplus energy can be utilized for water

electrolysis, producing hydrogen and, when necessary, the hydrogen is converted into energy through the fuel cell, to meet the demand required by the FPSO, or provide transient system support. The simulations of voltage and frequency stability were carried out using the PowerFactory DIGSILENT.

Keywords:

Offshore Wind Generation; Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC); Electrolysis, Power System Stability, Power System Operation; FPSO (Floating Production Storage and Offloading).

1. INTRODUÇÃO

Plataformas offshore de produção de petróleo e gás são consumidoras intensivas de energia elétrica. Essa energia é fornecida por turbinas a gás e/ou geradores diesel instaladas na própria unidade. Em sintonia com a transição energética, e como forma de redução de emissões de gases de efeito estufa, uma alternativa é a produção de energia elétrica por parques eólicos offshore para atendimento direto e de forma complementar a geração própria da plataforma. A vantagem de utilizar a energia eólica offshore em alto-mar é a possibilidade de extrair uma maior potência do vento, com velocidade maior e mais constante devido à inexistência de barreiras, bem como a ausência de limitações visual e de ruídos (ZOU et al, 2021). Além disso, pode possibilitar um aumento na extração de petróleo pela suplementação de energia.

Atualmente vem crescendo a opção de construir parques eólicos offshore mais afastados da costa, em águas profundas (*deep water wind farms*), sendo uma alternativa para alimentar empreendimentos de extração de óleo e gás (GWEC, 2023). Um empreendimento comercial bem-sucedido desse tipo de arranjo é o projeto "*Hywind Tampen*", o qual é o primeiro parque eólico flutuante do mundo construído especificamente para alimentar instalações offshore de petróleo e gás, fornecendo eletricidade aos campos petrolíferos da Equinor, *Snorre* e *Gullfaks*, no Mar do Norte norueguês. A estimativa é que em torno de 35% da carga de energia elétrica das plataformas *Snorre* e *Gullfaks* seja suprida por esse parque. Essa solução ajudará a reduzir a utilização de energia de turbinas a gás nessas plataformas, ao mesmo tempo que a previsão é de uma compensação de 200.000 ton. de emissões de CO₂ e 1.000 toneladas de emissões de NO_x por ano (EQUINOR, 2023).

A potencialidade offshore brasileira é muito favorável devido ao imenso mar territorial e ao regime de ventos. Análises conduzidas pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indicam a presença de um potencial eólico significativo, estimado em aproximadamente 700 GW, em áreas com profundidade de até 50 metros (EPE,2020). Não há ainda uma estimativa consolidada para o potencial de geração em águas profundas, onde encontram-se plataformas do pré-sal. Alguns projetos de P&D estão em curso para avaliar esse potencial, como é o caso do projeto Ventos de Libra desenvolvido no NIEPIEE da UFRGS.

Outra contribuição de parques eólicos offshore pode ser a produção de hidrogênio verde, produzido através de eletrolisadores, usando a energia eólica excedente e água purificada dos oceanos. Esses equipamentos podem ser alocados em plataformas já existentes, o que poderia reduzir consideravelmente os custos de produção (LUO,2022). Nas últimas décadas, avanços significativos foram feitos nos processos de eletrólise e na produção de energia renovável, tornando possível a produção de hidrogênio verde a um preço razoável (CALADO e CASTRO, 2021). A união dessa tecnologia com o grande potencial da energia eólica offshore no Brasil pode consolidar o país como uma superpotência de energia renovável (GWEC, 2022). O hidrogênio pode ser utilizado para a produção de amônia ou como combustível, tendo como produto a água, ao invés do CO₂, que é um gás diretamente associado ao efeito estufa.

Um dos problemas da geração eólica é a sua intermitência. Dessa forma, para uma operação mais estável e segura do sistema elétrico ao qual está conectada, é aconselhada a utilização de sistemas para compensar essa intermitência, como bancos de bateria, células a combustíveis, volante de inércia (*flywheel*) ou outros geradores. Entre as opções anteriores a utilização de geradores síncronos com reserva de capacidade tem sido a solução. Entretanto, o crescimento da utilização dos dispositivos de armazenamento de energia (*energy storage*) nos últimos, devido a melhoria nas tecnologias de materiais, queda de preço e tempo de resposta, tem impulsionado a opção por esses dispositivos. Dentro os dispositivos de armazenamento de energia o mais estudado tem sido o banco de baterias (BESS - *Battery Energy Storage System*), entretanto, tem aumentado o interesse pelo uso de células a combustível. Atualmente já existem opções comerciais que conseguem suprir potência na ordem de MW, como por

exemplo o modelo FCWave da BALLARD, que inclusive pode ser utilizado em operações marítimas (BALLARD, 2024). Aproveitando a ideia anterior de produção de hidrogênio verde na própria plataforma, quando há excesso de geração eólica, este trabalho apresenta a proposta de modelar e simular um sistema de energia composto por um parque eólico offshore, um equivalente de uma plataforma (gerador + cargas), um eletrolisador e uma célula a combustível do tipo PEMFC - *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, operando de forma conjunta, onde a PEMFC tem por função compensar as intermitências e injetar energia em caso de problemas com a geração convencional.

2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ao longo dos últimos anos a geração eólica offshore vem se consolidando como uma alternativa de produção de energia sustentável. Pode-se destacar que, em parques eólicos offshore, é possível explorar velocidades de ventos maiores e mais constantes, com menos restrições em relação a área ocupada e distância do aerogerador ao solo, além de praticamente não haver preocupação em relação ao impacto visual e de ruído. Dessa forma, os tamanhos dos projetos e as turbinas eólicas são geralmente maiores nos parques offshore e os indicadores de desempenho desses parques geralmente são melhores (EPE, 2020). Na Figura 1 pode-se observar o crescimento do tamanho do diâmetro do rotor e a potência das turbinas eólicas ao longo das últimas décadas, baseado em instalações eólicas offshore comerciais.

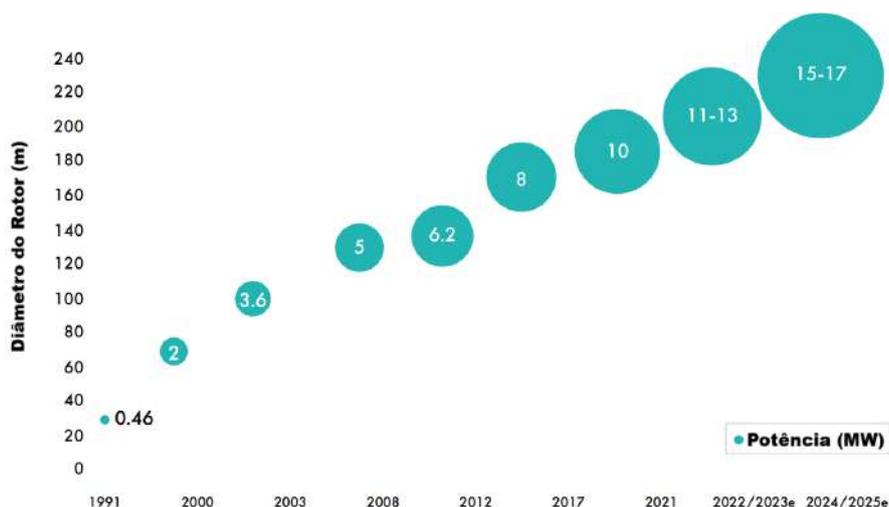


Figura 1 - Aumento da potência nominal de aerogeradores offshore (Adaptado - GWEC, 2022).

Para mostrar a evolução das potências das turbinas eólicas offshore, pode-se citar o exemplo da GE Renewable Energy, que instalou na Holanda um modelo de turbina eólica com potência de 12 MW, diâmetro do rotor de 220m e pá de 107m (GENERAL ELECTRIC, 2023). A turbina MingYang Smart Energy (MySE) 16-260 (MYSE, 2023), instalada na China, atualmente é a maior turbina eólica do mundo, com uma potência de 16 MW, diâmetro do rotor de 260 metros, sendo que cada uma de suas pás atinge 123 metros de comprimento. A cada volta a turbina varre uma área de 53 mil m² de ar. Ela ultrapassou o modelo GWH252-16MW, da também chinesa Goldwind, que possui capacidade de 16 MW, mas com um rotor um pouco menor, com 252 metros de diâmetro. Na esteira da expansão deste prometido mercado, a empresa chinesa CSSC, lançou no final de 2023 uma turbina eólica de 18MW e 260 metros de rotor. Especialistas tem-se perguntado qual será o limite construtivo e de potência desse tipo de geração (EPBR, 2023).

Assim como os geradores eólicos, as células a combustíveis também são conectadas ao sistema através de conversores de potência. Em relação a essa fonte, ela ainda está se encaminhando para a utilização comercial de larga escala (ALSHERI, 2018). Até o presente momento está sendo mais utilizada para suporte em serviços auxiliares, porém em Gonzales-Longatt e Torres, 2021 e Alsheri, 2018 já são demonstrados estudos utilizando células a combustíveis para o auxílio na regulação de frequência em sistemas de potência. Na referência (SIEMENS, 2021) é indicado o eletrolisador Silyzer 300, que além de produzir hidrogênio, também pode auxiliar a rede elétrica em relação à resposta de frequência primária.

Há trabalhos na literatura que exploram a produção de hidrogênio a partir da energia proveniente de parques eólicos. Calado e Castro, 2021, apresentam uma revisão bibliográfica em relação a produção de hidrogênio a partir de parques eólicos offshore, sendo que a referência Hunt e Nascimento, 2021 apresenta uma avaliação de como a indústria de óleo e gás no Brasil pode usufruir da infraestrutura, já existente, de exploração em águas profundas para a produção de hidrogênio. As referências (IBRAHIM et al, 2020) e (LUO, 2022) descrevem estudos de diferentes topologias para a produção de hidrogênio em alto mar. Skovgaard and HØgedal, 2022, relatam um estudo sobre operação e controle de parques eólicos com eletrolisadores, descrevendo o comportamento deste conjunto. Em Marvik, Øyslebø e Korpås, 2013 é apresentado um estudo dinâmico de parques eólicos offshore alimentando plataformas de gás e petróleo, porém sem levar em conta a utilização de células a combustíveis ou produção de hidrogênio através de eletrolisadores. A próxima seção apresenta a proposta de inserção de geração eólica offshore e produção de H₂ com geração utilizando PEMFC para suporte da operação de plataformas de petróleo e gás.

3. MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO

Para a realização deste artigo foi utilizado o software PowerFactory DigSILENT. Os modelos podem ser divididos em: modelos típicos convencionais e modelos WECC, ambos implementados no DigSILENT, e os modelos desenvolvidos e customizados para o eletrolisador e célula a combustível desenvolvidos em DSL (DigSILENT Simulation Language). A seguir são descritos de forma breve esses modelos.

3.1 – Modelos do Gerador Síncrono e controladores

O gerador síncrono e seus controladores utilizam modelos disponíveis no DigSILENT. Os dados utilizados são de geradores a gás típicos em uso nas plataformas do tipo FPSO. No caso dos controladores, foram realizados ajustes dos parâmetros para assegurar um desempenho dinâmico adequado e seguro.

O modelo do gerador representa um gerador síncrono de polos lisos. (KUNDUR, 1994). Para a representação da máquina síncrona nos sistemas modelados no DigSILENT foi utilizado o modelo *Standard*, o qual é implementado utilizando o modelo equivalente de segunda ordem completo para os eixos d-q, conforme (DIGSILENT, 2024a).

Para representar o regulador de tensão foi utilizado o modelo IEEE AC4A. Esse modelo é baseado em um retificador controlado, tendo como fonte o eixo da máquina síncrona (IEEE, 2017). Para o regulador de velocidade foi utilizado o modelo GGOV1, o qual representa um modelo turbina/regulador de turbinas a gás, com controlador PID (IEEE, 2013)

3.2 - Turbinas a Gás

As turbinas a gás são máquinas térmicas que convertem a energia química, armazenada no gás (combustível primário), em energia mecânica. Em plataformas esse tipo de turbina é um dos mais utilizados. O efeito do modelo da turbina está inserido no modelo GGOV1.

3.3 – Modelo de Carga

A representação mais realista possível dos elementos de um sistema elétrico é um fator decisivo no resultado dos estudos, tanto estático como dinâmicos. Uma plataforma de petróleo tem centenas de tipos diferentes de carga, tanto em funcionalidade como em potência. A representação da carga em estudos de estabilidade possui efeito direto sobre o comportamento do sistema, e por consequência, do resultado da simulação. Muitas vezes um caso classificado como instável, onde a carga foi representada como injeção de potência constante pode, de fato, ser uma distorção da realidade, em função de não ter sido considerada a variação das cargas com as magnitudes da tensão ou frequência. Neste artigo foram utilizadas duas representações de carga, descritas a seguir.

- Carga Estática
Este tipo de carga foi modelado através do modelo polinomial de carga. O DigSILENT possui um modelo que permite modelar o efeito da variação da tensão e da frequência (DIGSILENT, 2024b). No caso deste artigo, considerou-se dois tipos de cargas estáticas, ambas com comportamento

100% dinâmico e linearmente dependente da tensão, sem dependência da frequência. Uma carga foi modelada com a parcela ativa como 100% injeção de potência constante e a parte reativa como 100% impedância constante. A segunda carga foi considerada com a parcela ativa 100% corrente constante e a parte reativa tipo impedância constante.

- Motor de Indução
Um percentual elevado da carga da plataforma é composto de motores de indução das mais variadas potências. Para este estudo, foram adotados três tipos de motores de indução trifásicos, todos do tipo gaiola dupla, com diferentes potências nominais, os quais foram agrupados a fim de se obter a carga equivalente de uma plataforma marítima de extração de petróleo e gás. A modelagem dos motores pode ser consultada em DigSILENT, 2024c.

3.4 – Aerogeradores

Neste trabalho o gerador eólico offshore é um Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes (PMSG - *Permanent Magnet Synchronous Generator*). Diferente de outros tipos de geradores, no PMSG a excitação é fornecida por um conjunto de ímãs permanentes para gerar um fluxo magnético constante no rotor. O gerador é conectado à rede elétrica através de um conversor pleno, conforme mostrado na Figura 2.

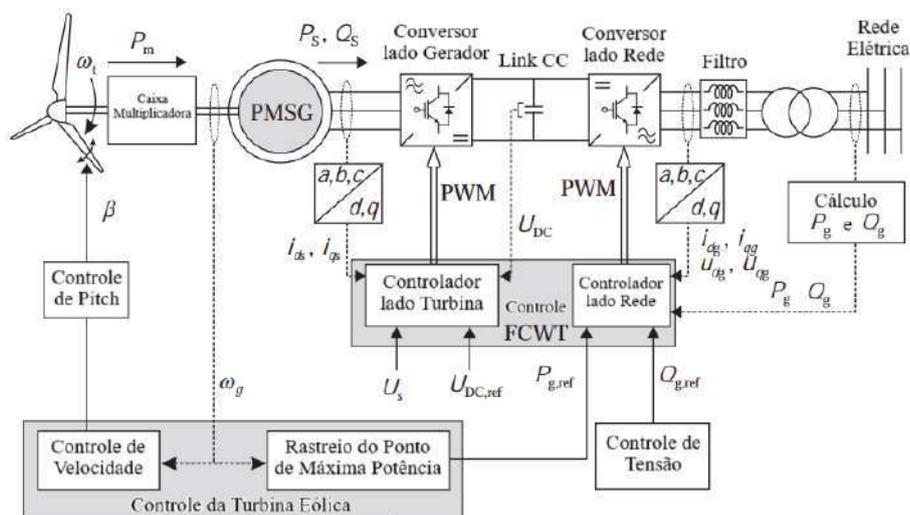


Figura 2 - Esquemático de um gerador do tipo PMSG (Adaptado - Eremia e Shahidehpour, 2013).

Esta configuração desacopla a velocidade do gerador da frequência do sistema de energia e permite uma ampla faixa de operação de velocidade variável (EREMIA e SHAHIDEHPOUR, 2013).

Existem diversas formas de se modelar aerogeradores e, de acordo com o tipo de conexão à rede elétrica, esses podem ser agrupados em quatro categorias (EREMIA e SHAHIDEHPOUR, 2013): aerogeradores de velocidade fixa (Tipo 1), aerogeradores de escorregamento variável (Tipo 2), aerogeradores com conversor parcial (Tipo 3) e aerogeradores com conversor pleno (Tipo 4). Para parques eólicos offshore, os tipos mais usuais são o Tipo 3 e Tipo 4, sendo o Tipo 4 o que está sendo mais utilizados em novos parques eólicos offshore (EREMIA e SHAHIDEHPOUR, 2013). O Tipo 4 pode ser subdividido em 4A (WTG4A) e 4B (WTG4B), sendo que a diferença entre eles é que no Tipo 4^a são considerados os efeitos mecânicos da turbina, através do modelo de inércia de 2 massas.

Como o gerador PMSG, na configuração WTG4A, é totalmente desacoplado da rede pelo conversor, a operação da turbina eólica não afeta o fator de potência e a potência reativa do lado da rede. Dessa forma, ele pode ser modelado no DigSILENT como um gerador estático *ElmGenstat* do tipo fonte de tensão, sendo o comportamento da planta, visto pela rede, determinado pelo conversor (DIGSILENT, 2024d)

3.5 – Modelos Genéricos WECC

A modelagens dos aerogeradores normalmente estão restritas às empresas que os fabricam. Algumas entidades internacionais, como o IEC (*International Electrotechnical Commission*) e o WECC (*Western Electricity Coordinating Council*), criaram modelos dinâmicos genéricos de turbinas eólicas, os quais são capazes de representar o comportamento dinâmico de diversos tipos de aerogeradores (WECC, 2014) (EPRI, 2014). Esses modelos já foram validados em uma grande quantidade de trabalhos, e estão implementados (built-in) em vários softwares, como por exemplo o DigSILENT, Powerworld e PSLF.

Cabe salientar que ao utilizar modelos do tipo WECC, algumas limitações devem ser levadas em conta:

- A dinâmica do vento não é modelada, portanto a velocidade do vento é constante. Essa simplificação é considerada adequada para estudos de estabilidade transitória, uma vez que os tempos envolvidos estão na faixa de 10 a 60s;
- Os modelos foram desenvolvidos para sistemas balanceados de sequência positiva;
- São adequados para análise de oscilações mecânicas de baixa frequência (0,1 – 3 Hz)
- A frequência de chaveamento dos conversores estáticos é assumida ser muito mais alta que a faixa de fenômenos eletromecânicos, dessa forma os sinais de controle são modelados como equações algébricas, sendo que não são modeladas as malhas internas do conversor.

• Gerador Eólico

A modelagem do PSMG, de acordo com os modelos propostos em WECC, 2014, pode ser feita utilizando um sistema de Tipo 4A, que é caracterizado por um gerador totalmente desacoplado da rede, por meio do conversor eletrônico de potência dimensionado pela potência nominal do gerador. O sistema conversor é construído com dois conversores, conversor do lado da rede e conversor do lado do estator, ambos baseados em IGBT e conectados via link CC. O conversor do lado da rede é controlado para permitir que o sistema controle a potência ativa e reativa, enquanto o conversor do lado do estator permite o controle da operação do gerador para extrair a potência máxima da velocidade do vento disponível (TALEB, 2019).

A estrutura de uma usina eólica (parque eólico) utilizando a modelagem WECC é apresentada na Figura 3, que consiste nos módulos: REGC_B, REEC_D, REPC_A e WTGT_A. Destaca-se que o modelo WTGT_A é utilizado apenas para emular aerogeradores do Tipo 4A e o bloco REPC_A é opcional e não foi utilizado nesse trabalho.

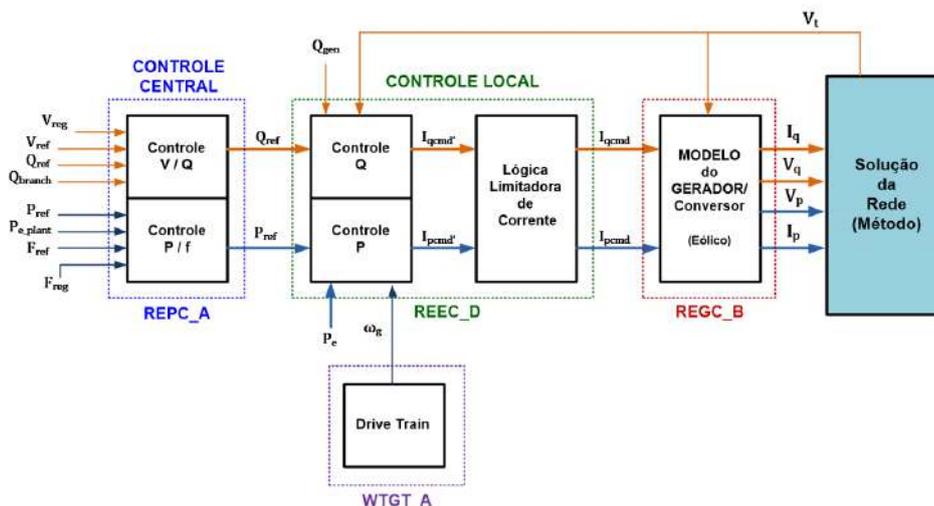


Figura 3 - Diagrama dos blocos que compõem a modelagem de um parque eólico.

A descrição resumida dos blocos do Modelo da Figura 3 é apresentada a seguir (EPRI, 2014).

Módulo Gerador/Conversor de Energia Renovável (REGC_B - Renewable Energy Generator/Converter): Utilizado para representar o gerador/conversor. Ele processa os comandos de corrente ativa e reativa e gera a injeção de corrente ativa e reativa no modelo da

rede elétrica na qual está conectado. O modelo REGC_B apresentado na Figura 3 possui os seguintes recursos de controle: gerenciamento da corrente reativa durante eventos de elevação de tensão na barra do gerador (inversor); gerenciamento da corrente ativa durante sub tensão para emular de forma simples e aproximada a resposta do controle do *Phase-Locked Loop* (PLL) do inversor, e lógica de potência durante eventos de sub tensão que permite uma resposta controlada da corrente ativa durante e imediatamente após afundamento de tensão.

Módulo Controle Elétrico de Energia Renovável (REEC_D - Renewable Energy Electrical Control): Utilizado para representar os controles elétricos dos conversores do lado dos aerogeradores. A partir da referência de potência ativa e reativa do módulo de controle da planta REPC_A, e da realimentação da tensão terminal e da saída de potência do gerador são fornecidos os sinais de comandos de corrente ativa e reativa ao módulo REGC_B. Esse módulo possui uma grande versatilidade de opções de controle (controle de potência reativa, de potência ativa, fator de potência constante e tensão. Um conjunto de chaves habilita/desabilita as funções escolhidas, através da ativação de laços de controle. Pela correta combinação de opções podem ser priorizadas a injeção de corrente ativa ou reativa, auxiliando no comportamento dinâmico da rede, bem como o montante despachado pelo controlador da usina em conjunto com o módulo REPC.

Módulo Controle de Planta de Energia Renovável (REPC_A - Renewable Energy Plant Control): Este módulo é utilizado para representar o controlador da usina, sendo opcional. Ele deve ser utilizado quando se deseja executar o controle de potência ativa e/ou reativa de toda a usina (parque) de forma centralizada, simulando ações que são executadas por um centro de controle, como o despacho de potência, ativa e reativa, definindo uma potência de referência para as unidades geradoras da usina. Ele processa a saída de tensão e potência reativa para emular o controle volt/var no nível da planta e também processa a saída de frequência e potência ativa para emular o controle de potência ativa. Esse módulo não foi utilizado neste trabalho.

Trem de Acionamento do Aerogerador (WTGT_A - Wind Turbine Generator Transmission): Utilizado para simular o comportamento das oscilações torcionais no trem de acionamento (*drivetrain*). O chamado trem de acionamento da turbina eólica compreende o eixo de transmissão, caixa de engrenagem, frenagem aerodinâmica e mecânica e emula as oscilações torcionais do rotor da máquina. Este modelo é representado pelo modelo simplificado de duas massas (turbina-gerador), que leva em conta as os torques do gerador e da turbina e o amortecimento do eixo.

- **Modelo do Eletrolisador**

O eletrolisador é acoplado à rede externa por meio de um retificador CC-CA, seguido por um conversor CC-CC que controla a potência de entrada modulando a corrente elétrica. No software DigSILENT, o eletrolisador é modelado como uma carga geral com um modelo dinâmico associado. O modelo utilizado é baseado no proposto em Gonzales-Longatt e Torres, 2021, que foi projetado para ser uma representação simples e relativamente precisa da dinâmica do lado da rede do eletrolisador, em especial no que diz respeito à resposta do consumo de energia ativa, visto que para estudos de frequência a precisão da dinâmica de rampa do eletrolisador constitui um aspecto mais relevante do processo de modelagem. O diagrama de blocos do sistema de controle do eletrolisador é mostrado na Figura 4.

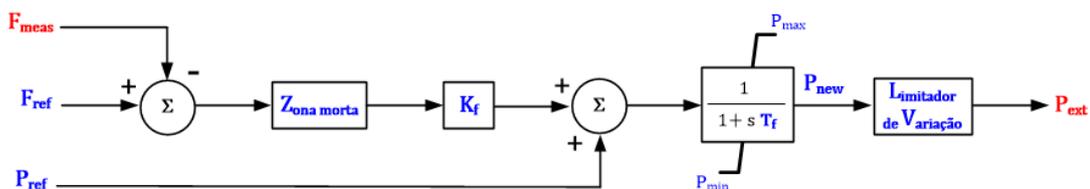


Figura 4 - Bloco de controle do eletrolisador.

- **Modelo da Célula a Combustível**

As células a combustível são dispositivos de conversão que transformam a energia química dos combustíveis em energia elétrica e térmica por meio de processos eletroquímicos. Dessa forma, a modelagem dinâmica da célula a combustível deve considerar tanto os processos químicos quanto os termodinâmicos. O modelo dinâmico da célula a combustível utilizado é baseado no estudo experimental feito em Kim et al, 2010, que estima os parâmetros e coleta dados empíricos da célula a combustível NexaTM PEM de 1,2 kW. Na Figura 5 é apresentado o diagrama de blocos do modelo dinâmico da PEMFC.

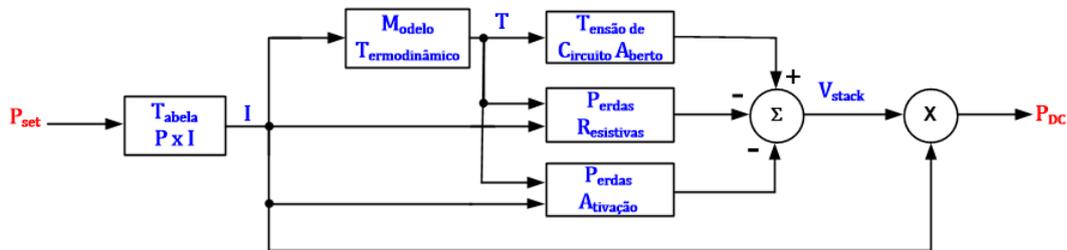


Figura 5 - Diagrama de blocos do modelo dinâmico da PEMFC.

O controle da célula a combustível utilizado no trabalho é baseado no proposto em Gonzales-Longatt e Torres, 2021 e é representado na Figura 6. Este sistema de controle tem o objetivo de integrar a PEMFC com o sistema de potência, a fim de auxiliar no controle de frequência primário e pode ser dividido em: controle de frequência, modelo dinâmico e controle de potência, conforme observado na Figura 6. Destaca-se que a variação de geração da célula combustível, ou a carga consumida pelo eletrolisador levam em conta a variação de frequência medida no sistema teste. No software DigSILENT, a célula a combustível é representada como um gerador estático, atuando como de fonte de corrente e controlado externamente.

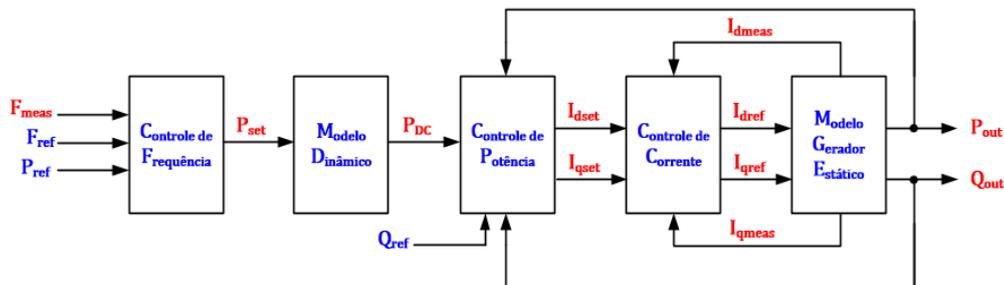


Figura 6 - Bloco de controle da célula a combustível PEMFC.

Em (ALSHERI, 2018), a modelagem da célula a combustível PEM no DigSILENT leva em conta que:

- O hidrogênio e o ar fornecidos comportam-se como gases ideais distribuídos de forma uniforme, injetados a pressão constante nos canais de fluxo de gás da célula a combustível;
- as propriedades termodinâmicas da pilha combustível são avaliadas à sua temperatura média, com capacidade térmica específica da pilha constante e para uma temperatura ambiente constante de 25°C;
- os parâmetros das células de combustível individuais são agrupados para representar uma única pilha, e várias pilhas podem ser agregadas para representar uma planta de células a combustível;
- a capacidade de armazenamento de hidrogênio é suficientemente grande para fornecer hidrogênio suficiente à célula a combustível e para absorver o hidrogênio produzido pelos eletrolisadores.

4. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DAS POTENCIALIDADES

O sistema teste estudado considera a integração de um parque eólico offshore com uma plataforma de produção de petróleo e gás (FPSO). A configuração do parque eólico offshore é composta de um sistema coletor operando em 33kV CA e de interligação com a plataforma. Na FPSO são consideradas cargas e geradores típicos desse tipo de plataforma. O sistema teste utilizado para a realização dos testes é representado na Figura 7, sendo na Figura 8 ilustrado o sistema teste modelado no PowerFactory DigSILENT Versão 2023/SP1. Dados desse sistema podem ser obtidos em (MARCOLIN, 2024).

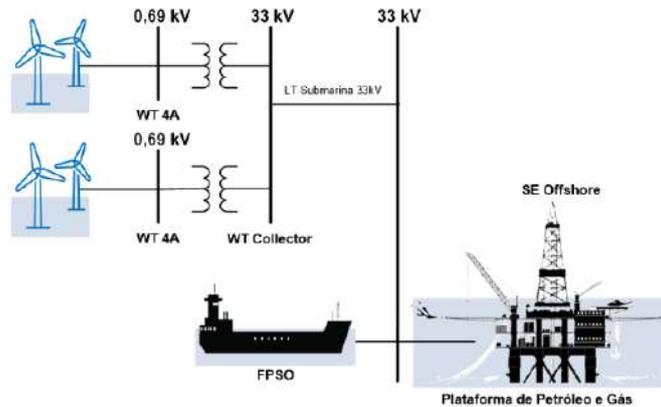


Figura 7 – Esquemático do sistema teste utilizado.

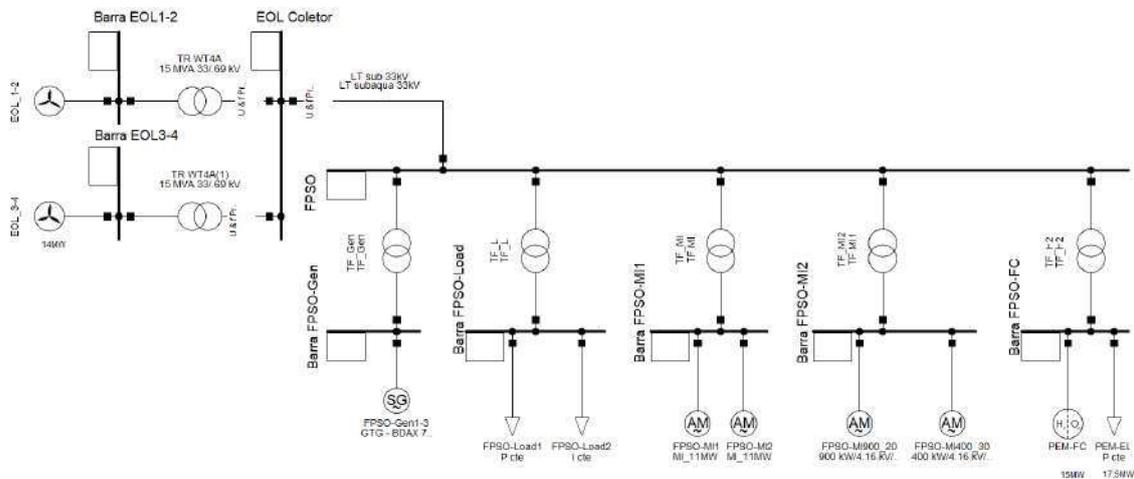


Figura 8 - Sistema teste modelado no DigSILENT.

A configuração original da FPSO é composta, de forma resumida por:

- 4 geradores síncronos a gás de 40 MVA nominal cada. Nas simulações considerou-se 3 geradores em operação e um de reserva (FPSO-Gen1-3);
- 2 cargas estáticas equivalentes, uma de 23,0 MW e 14,0 Mvar (FPSO-Load1) e outra de 8,0 MW e 5,0 Mvar (FPSO-Load2);
- 1 bloco composto de 30 motores de indução de 400 kW cada (FPSO-MI400_30);
- 1 bloco composto de 20 motores de indução de 900 kW cada (FPSO-MI900_20);
- 2 motores de indução de 11 MW (FPSO-MI1 e FPSO-MI2);
- 4 transformadores de 50 MVA cada (TF_GEN);
- 2 transformadores de 50 MVA (TF_L) e (TF_MI2);
- 1 transformador de 40 MVA (TF_MI);
- 1 transformador de 20 MVA (TF_H2).

Adicionalmente, são conectadas na FPSO os seguintes equipamentos:

- 1 módulo eletrolisador do tipo PEM com 17,5 MW de potência nominal (PEM_EL);
- 1 módulo de célula a combustível do tipo PEMFC com 15 MW de potência nominal (PEM_FC).

O parque eólico offshore é composto de:

- 4 aerogeradores do tipo PMSG de 15 MVA cada, agrupados em 2 blocos (EOL_1-2 e EOL_3-4);
- 2 transformadores de 15 MVA, cada um associado a dois geradores eólicos (TR_WT4A e TR_WT4A1);
- ALT que interliga os geradores eólicos a FPSO é composta de um cabo submarino de três núcleos com blindagem de fio de cobre. Possui seção de 800mm², com isolamento XLPE.

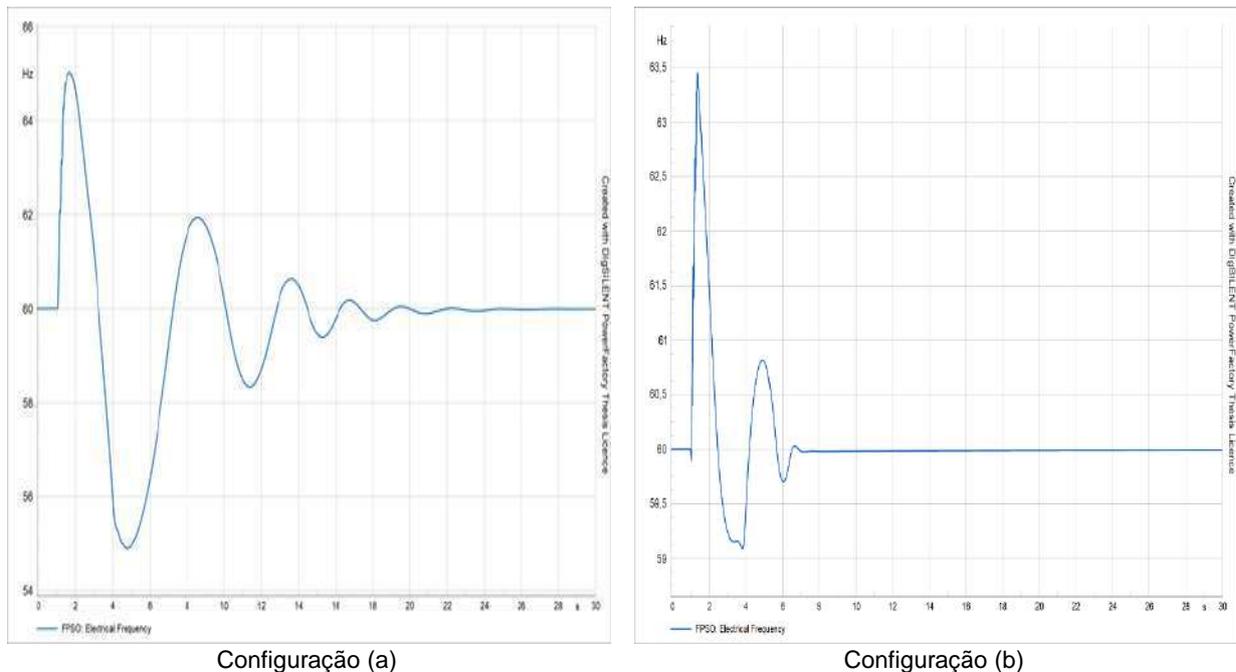
Para fins de análise e organização do trabalho, serão definidos dois tipos de configuração, relacionados com a Figura 8:

- Configuração (a): nesta configuração o sistema opera isolado somente com a configuração original da FPSO;
- Configuração (b): nesta configuração o sistema opera com o eletrolisador, a célula a combustível conectadas na barra da FPSO e com a conexão do parque eólico offshore com a plataforma.

A verificação do comportamento do sistema teste com e sem a utilização de eletrolisadores e células a combustível foi feita através de dois eventos: curto-circuito na barra FPSO e perda e acionamento de motor de indução no sistema da FPSO. Em ambos os eventos foram analisados os comportamentos de frequência na barra FPSO, tensões nas barras do sistema e potência ativa dos geradores e cargas. Através da análise dessas curvas será avaliado o impacto na estabilidade de frequência causado pela inserção da célula a combustível.

4.1 Curto-Circuito trifásico na barra FPSO

Para simular esse evento foi aplicado um curto-circuito trifásico no tempo de 1,0 s, com duração de 300ms. Após esse tempo, o curto-circuito foi eliminado sem atuação da proteção, caracterizando um evento transitório. Na Figura 9 é mostrado o comportamento da frequência para as configurações (a) e (b). Na Figura 10 e na Figura 11 são mostrados os comportamentos das tensões nas barras do sistema e as potências dos geradores e cargas, respectivamente, para as configurações (a) e (b).



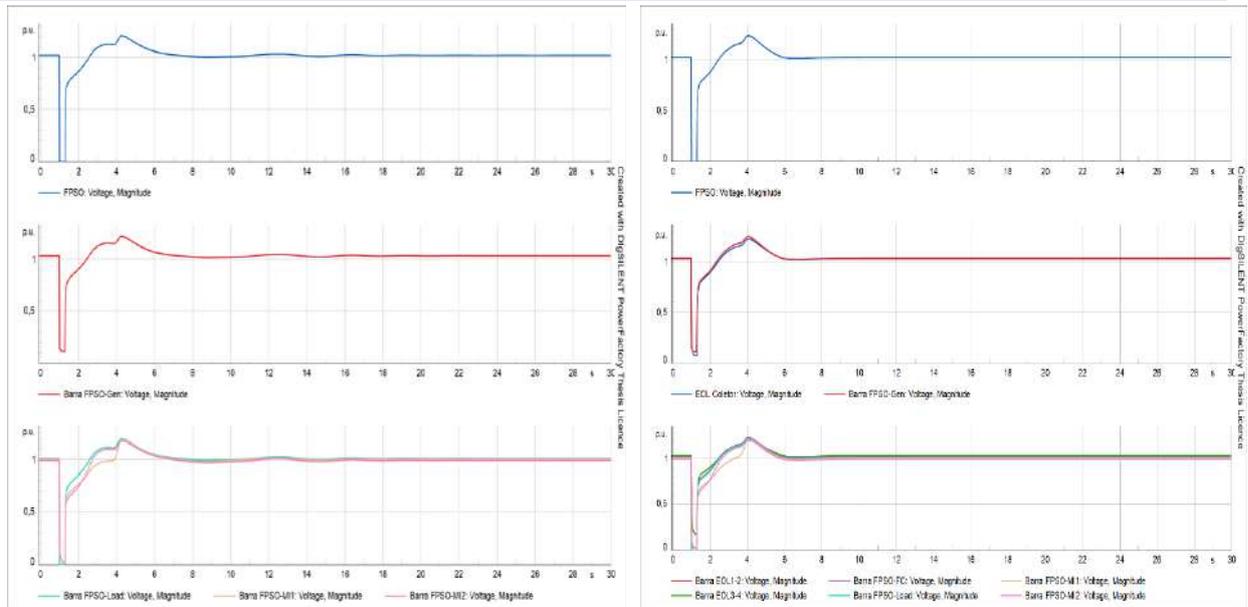
Configuração (a)

Configuração (b)

Figura 9 - Frequência na barra FPSO para o evento 1.

Na Figura 9 (a) é possível observar que na configuração (b) a variação de frequência é inferior à configuração (a), tanto em questão de valores máximos/mínimos, quanto em relação à duração da oscilação. No caso (a) a frequência varia entre 55 e 65Hz e estabiliza em torno de 24s, enquanto no caso (b) a variação da frequência fica entre 59 e 60,5Hz, estabilizando em torno de 8s.

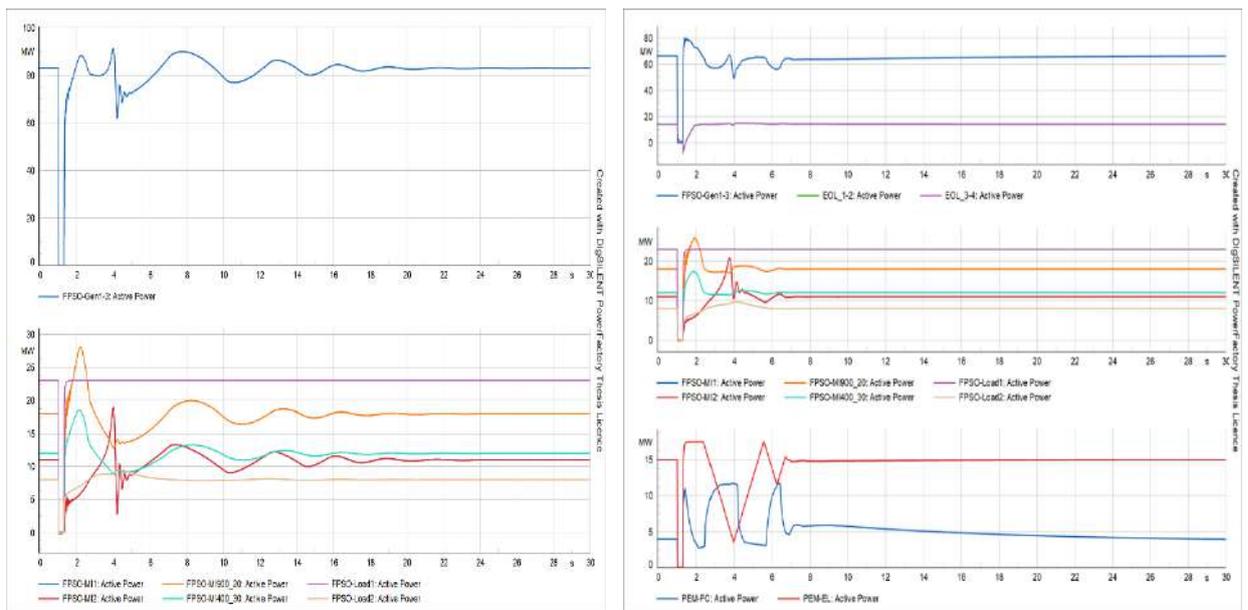
Na Figura 10 observa-se que as tensões tiveram comportamento similar para as configurações (a) e (b), estabilizando em torno de 6,0s. Por fim, na Figura 11 é possível observar o comportamento do eletrolisador e da célula a combustível durante o evento transitório, variando sua geração/carga consumida a fim de estabilizar a frequência, de acordo com a variação de frequência medida.



Configuração (a)

Configuração (b)

Figura 10 – Tensões nas barras para o evento 1.



Configuração (a)

Configuração (b)

Figura 11 – Potências ativas para o evento 1.

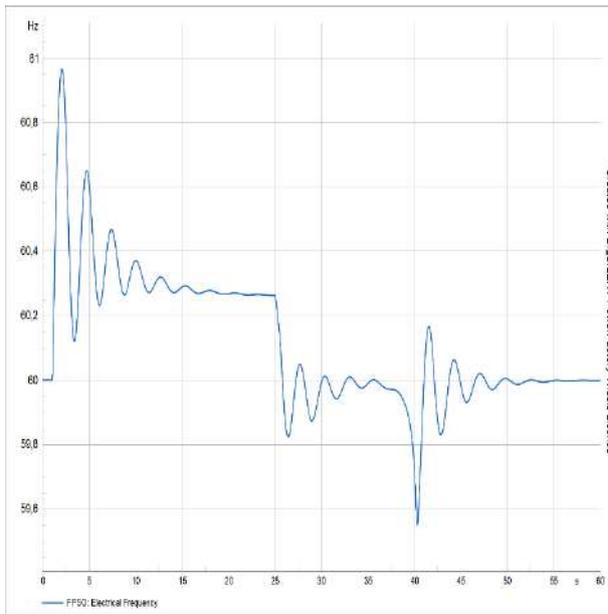
4.2 Perda e Acionamento de Motor de Indução

Para simular esse evento foi aberto o disjuntor que conecta o motor de indução FFSO-MI1 em 1,0s. Em 25,0s o mesmo motor é inserido novamente no sistema. Neste caso é considerado o comportamento dinâmico de partida deste motor de indução. Na Figura 12 - Frequência na barra FFSO para o evento 2. é mostrado o comportamento da frequência para as configurações (a) e (b). Nas Figura 13 e 14 são mostrados os comportamentos das tensões nas barras e as potências dos geradores e cargas, respectivamente, para as configurações (a) e (b).

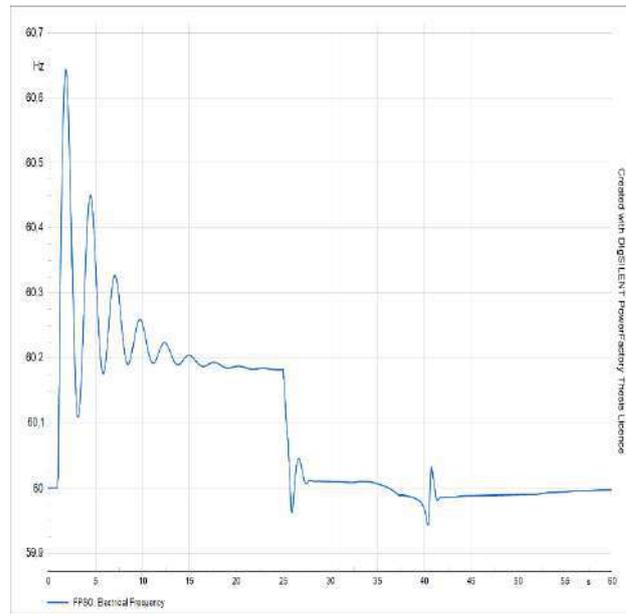
Na Figura 12 é possível observar que na configuração (b) há uma melhoria na estabilidade de frequência em relação à configuração (a). Quando o motor de indução é desconectado, o pico da frequência em (a) é de aproximadamente 61,0Hz, enquanto em (b) é de 60,65Hz. Ambas as configurações estabilizam em torno de 20,0s, porém em (b) estabiliza em uma frequência mais próxima a 60Hz. Nessa situação a célula

a combustível já está operando próximo ao seu limite inferior estabelecido e o eletrolisador no seu limite superior, dessa forma eles tendem a contribuir menos para a estabilização do sistema. Esse comportamento pode ser observado na Figura 14.

Quando o motor é adicionado novamente ao sistema há uma melhoria mais significativa, pois a célula a combustível pode suprir momentaneamente a potência requerida pelo motor, de acordo com a variação de frequência na barra FPSO. Observa-se que na configuração (a) a frequência cai para cerca de 59,6Hz e estabiliza em 55,0s, enquanto em (b) a frequência fica em 59,95Hz, uma melhoria muito significativa, ainda que demore um pouco mais para estabilizar novamente em 60Hz. Porém nota-se que em todo período a frequência ficou muito próxima aos 60Hz.

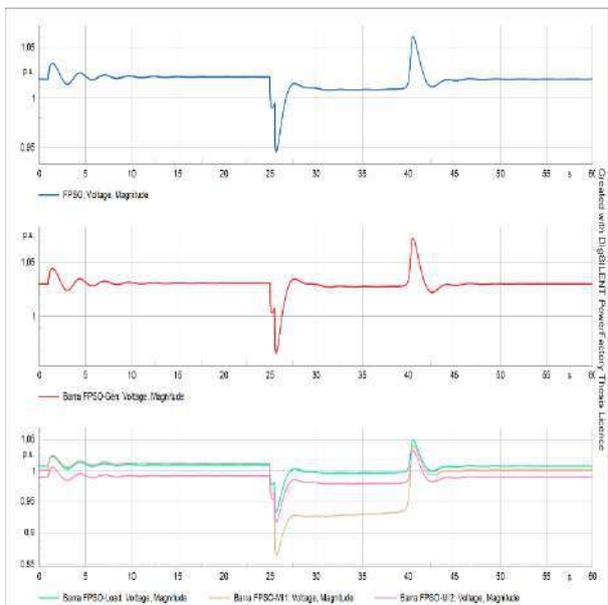


Configuração (a)

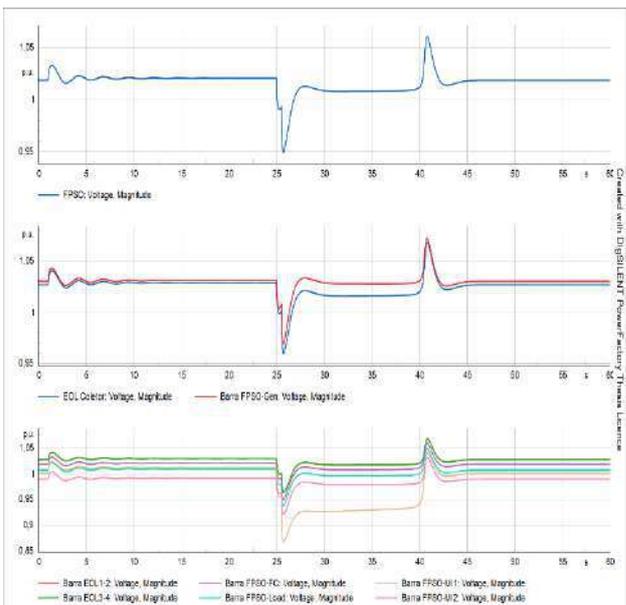


Configuração (b)

Figura 12 - Frequência na barra FPSO para o evento 2.



Configuração (a)



Configuração (b)

Figura 13 - Tensões nas barras para o evento 2.

Na Figura 13 observa-se que as tensões tiveram comportamento similar para as configurações (a) e (b), estabilizando em torno de 45,0s. Nota-se que em 25,5s há uma oscilação na tensão causada pelo

acionamento do motor. No tempo de 40,0s é verificado um pico na tensão que é causado pelo comportamento do motor de indução.

Na Figura 14 é possível observar o comportamento do eletrolisador e da célula a combustível durante o evento transitório, variando sua geração/carga consumida a fim de estabilizar a frequência, de acordo com a variação de frequência medida. Observa-se também o comportamento do acionamento do motor de indução FPSO-MI1 ao longo do tempo, aumentando até estabilizar em seu valor nominal e sendo acompanhado pelo aumento de geração dos geradores da FPSO.

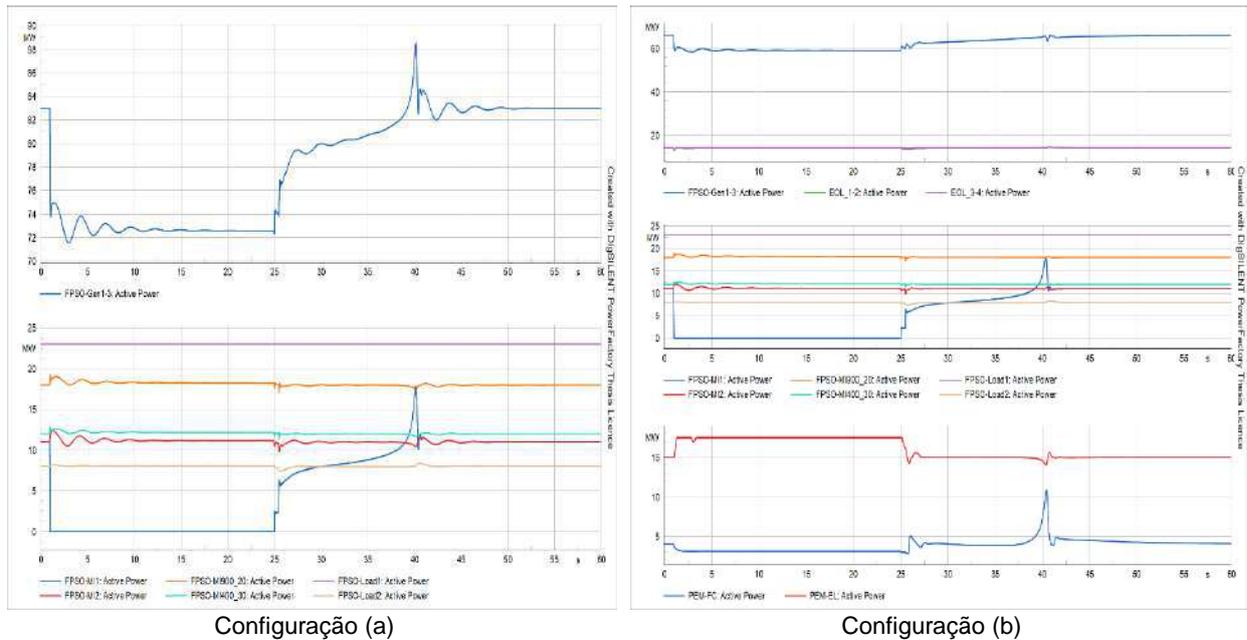


Figura 14 - Potências ativas para o evento 2.

5. CONCLUSÃO

O petróleo e o gás natural ainda terão destaque nas matrizes energéticas de vários países. Entretanto, acordos internacionais para redução da emissão de gases do efeito estufa e a transição energética terão impacto na indústria petrolífera nos próximos anos. Para contribuir neste processo uma das opções é utilizar a energia eólica offshore para complementar a demanda de plataformas de extração e processamento de petróleo e gás. Entretanto, esse tipo de geração insere variabilidade de geração devido as suas características. Na extração de petróleo em plataformas a continuidade e segurança nos processos é essencial, sendo que isto implica em manter a estabilidade de frequência e tensão em nível adequado. Nesta situação, a utilização de dispositivos de armazenamento de energia, como células a combustíveis combinadas com eletrolisadores, é uma alternativa para compensar esta variabilidade, além de auxiliar em eventos transitórios e perda/conexão de equipamentos, uma vez que possuem um tempo de resposta rápido e uma alta capacidade de injeção de energia durante contingências. Além disso, a produção de hidrogênio verde pode ser realizada nos períodos de exceção de geração eólica.

No evento transitório (curto-circuito trifásico temporário) simulado a variação de frequência com a inserção da célula a combustível estabiliza a frequência em torno de 8,0s, com uma variação no intervalo de 59,0 a 60,5 Hz, e sem a presença da célula a combustível a frequência varia entre 55 e 65Hz e estabiliza em torno de 24s. As tensões estabilizam em torno de 6,0s na presença da célula a combustível para este evento. Para um evento de conexão e desconexão de motores de indução, com a operação da célula a combustível há uma melhoria na estabilidade de frequência, que estabiliza em torno de 60,65 Hz em torno de 20,0s, bem como diminuição no pico da frequência. Quando o motor é reconectado há uma melhoria mais significativa, sendo que a frequência estabiliza em 59,95Hz, à medida que no caso sem a célula a combustível a frequência cai para cerca de 59,6Hz e estabiliza em 55,0s. Dessa forma, os resultados demonstram claramente a contribuição da célula a combustível para a melhoria da estabilidade do sistema.

REFERÊNCIAS

- ALSHEHRI, F. A. **Ancillary Services from Hydrogen Based Technologies to Support Power System Frequency Stability**. MSc Dissertation. Delft University of Technology (TU Delft).
- BALLARD. **Fuel Cell Power Products – Marine Modules**. Disponível em: <<https://www.ballard.com/fuel-cell-solutions/fuel-cell-power-products/marine-modules>>.
- CALADO, G.; CASTRO, R. Hydrogen Production from Offshore Wind Parks: Current Situation and Future Perspectives. **Applied Sciences**, v. 11, n. 12, p. 5561, 1 jan. 2021.
- DIGSILENT. **Technical Reference – Synchronous Machine**. DigSILENT GmbH, 2024a.
- DIGSILENT. **Technical Reference – General Load**. DigSILENT GmbH, 2024b.
- DIGSILENT. **Technical Reference – Asynchronous Machine**. DigSILENT GmbH, 2024c.
- DIGSILENT. **Technical Reference – Static Generator**. DigSILENT GmbH, 2024d.
- EPE. **Roadmap Eólica Offshore Brasil - Perspectivas e Caminhos para a Energia Eólica Marítima**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/l/>>. Acesso em: 16 jul. 2024.
- EPRI. **Specification of the Second Generation Generic Models for Wind Turbine Generators**. Palo Alto (EUA): Electric Power Research Institute, 2014.
- EPBR-<https://epbr.com.br/maior-turbina-eolica-offshore-do-mundo-entra-em-operacao-na-china/>. Acessado em 18/07/2024.
- EQUINOR, “Projeto Hywind Tampen,” <https://www.equinor.com/energy/hywind-tampen>, 2023.
- EREMIA, M.; SHAHIDEHPOUR, M. **Handbook of Electrical Power System Dynamics**. Wiley-IEEE Press, 2013.
- GENERAL ELECTRIC. **Haliade-X Offshore Wind Turbine - Record-Setting Offshore Wind Technology**. Disponível em: <<https://www.ge.com/renewableenergy/wind-energy/offshore-wind/haliade-x-offshore-turbine>>.
- GONZALEZ-LONGATT, F. M.; TORRES, J. L. R. **Modelling and Simulation of Power Electronic Converter Dominated Power Systems in PowerFactory**. Springer, 2021. p. 269–283
- GWEC. **Global Offshore Wind Report 2022**. Disponível em: <<https://gwec.net/gwecs-global-offshore-wind-report/>>.
- GWEC. **Global Offshore Wind Report 2023**. Disponível em: <<https://gwec.net/gwecs-global-offshore-wind-report-2023/>>.
- IEEE. **IEEE Std 421.1 - IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines**. NY (EUA): IEEE Power Engineering Society, 2007.
- IEEE. **PES-TR1 - Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies**. IEEE Power & Energy Society, jan. 2013.
- KIM, H. et al. A Simple Dynamic Model for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) Power modules: Parameter Estimation and Model Prediction. **Intern. Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 8, p. 3656–3663, abr. 2010.
- KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. Palo Alto (EUA): McGraw-hill New York, 1994. v. 7
- LUO, Z. et al. Hydrogen Production from Offshore Wind Power in South China. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 58, May 2022.
- MARCOLIN, G. A. “Análise de Estabilidade de Sistemas Híbridos com Usinas Eólicas Offshore Combinadas com Produção de H₂ e Células a Combustíveis”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. 2024.
- MYSE - <https://www.myse.com.cn/en/wind-turbine/index.aspx>. Acessado em 18/07/2024.
- SIEMENS ENERGY. **PEM Electrolyser Technology Flexible, Efficient and Scalable New Energy Business**. Disponível em: <<https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product-offerings/hydrogen-solutions.html>>. Acesso em: 16 jul. 2024.
- TALEB, H. H. **Fault Analysis and Protection Design for Offshore Wind Farm Electrical System**. MSc Dissertation. Dep. of Energy Technology, Aalborg University Esbjerg (Dinamarca).
- WECC. **WECC Wind Plant Dynamic Modeling Guidelines**. WECC Renewable Energy Modeling Task Force, 2014.
- ZOU, X. et al. Sustainable offshore oil and gas fields development: Techno-economic feasibility analysis of wind–hydrogen–natural gas nexus. **Energy Reports**, v. 7, p. 4470–4482, nov. 2021.