



16-17 Agosto / 23
PLATAFORMA DIGITAL BWP

Categoria 2

Novas Tecnologias

ENERGIA EÓLICA OFFSHORE E PRODUÇÃO DE AÇO VERDE: UMA ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E DE MERCADO

Jéssica Rayany Rodrigues Silva¹, Mayara Adrielly Leal de Oliveira Rodrigues², Andressa Medeiros Santiso³, David Cassimiro de Melo⁴, Eloísa Conceição Nascimento Silva⁵, Mario Orestes Aguirre González⁶

1, 2, 3, 4, 5, 6 CREATION Research Group – Grupo de pesquisa em Inovação de Produtos e Processos para Energias Renováveis/Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção/UFRN

jessica.rodrigues.115@ufrn.edu.br ; mayara.leal.702@ufrn.edu.br ; andressamsantiso@gmail.com ; david.cassimiro.096@ufrn.edu.br ; eloisa.nascimento.093@ufrn.edu.br ; mario.gonzalez@ufrn.br

RESUMO

Os países estão empenhados em direcionar esforços para a descarbonização mundial, visando alcançar as metas estabelecidas pelo Acordo de Paris. Nesse contexto, o hidrogênio (H₂) desponta como o pilar central da transformação energética necessária para conter o aquecimento global, uma vez que essa fonte de energia pode desempenhar um papel significativo na descarbonização de setores, como a produção de materiais metálicos e o aço. Embora a tecnologia de redução direta do ferro por hidrogênio (DRI-H₂) para a fabricação de aço ainda não esteja comercialmente disponível, o número de projetos de demonstração está em constante crescimento. Essa indústria tem como principal requisito a disponibilidade de hidrogênio e eletricidade verdes e de baixo custo. Considerando que, dentre todas as opções de eletricidade renovável, a energia eólica *offshore* tem o maior potencial para a produção de H₂V, este artigo tem por objetivo analisar o cenário internacional de tecnologias e projetos de H₂V, produzido a partir da energia eólica *offshore*, voltados para a produção de aço verde via DRI-H₂. A pesquisa foi conduzida em duas etapas: pesquisa teórica e estudo de caso. Com base na análise realizada, podemos inferir que: (i) Projetos comerciais de H₂V já poderão ser observados no período entre 2025-2030; (ii) O principal requisito para o setor é a disponibilidade de grande quantidade de energia elétrica renovável e H₂V de baixo custo; (iii) Na produção de aço verde, a eletrólise SOEC se destaca por possuir maior eficiência na conversão de energia; (iv) A rota DRI-H₂ apresenta viabilidade técnica e vantagens competitivas e em relação à rota convencional; e (v) O setor terá uma importante contribuição na geração de empregos verdes e mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Assim, podemos inferir que o mercado do aço verde se encontra em fase de planejamento e se prepara para uma expansão considerável nos próximos anos. Ainda, devido à grande quantidade de energia renovável requerida no processo, apontam-se as usinas eólicas *offshore* como sendo uma das principais fornecedoras dessa energia.

Palavras-chaves:

Aço Verde; Hidrogênio Verde; Eólica *Offshore*; Descarbonização; DRI-H₂; Siderurgia.

ABSTRACT

Countries are committed to directing efforts towards global decarbonization, with the aim of achieving the goals established by the Paris Agreement. In this context, hydrogen (H₂) is considered as the central pillar of the necessary energy transformation to address global warming, as it can significantly contribute to decarbonizing sectors such as metal production and steel manufacturing. While the technology of direct reduction of iron by hydrogen (DRI-H₂) for steel production is not yet commercially available, the number

of demonstration projects is consistently increasing. The primary requirement of this industry is the availability of green and cost-effective hydrogen and electricity. Considering that offshore wind energy has the highest potential among all renewable electricity options for H₂ production, this article aims to analyze the international scenario of H₂ production from offshore wind energy, specifically for the production of green steel through DRI-H₂. The research was conducted in two stages: theoretical research and a case study. Based on the analysis conducted, it can be inferred: (i) Commercial H₂ production projects can be observed between 2025-2030; (ii) The primary requirement for the sector is the availability of a substantial amount of renewable electricity and low-cost H₂; (iii) In the production of green steel, the solid oxide electrolysis cell (SOEC) stands out for its higher energy conversion efficiency; (iv) The DRI-H₂ route demonstrates technical feasibility and competitive advantages compared to the conventional route; and (v) The sector will significantly contribute to the creation of green jobs and the mitigation of greenhouse gas emissions. Thus, we can infer that the green steel market is in the planning phase and is preparing for substantial expansion in the next years. Furthermore, due to the considerable amount of renewable energy required in the process, offshore wind power is identified as one of the primary suppliers of this energy.

Keywords:

Green Steel; Green Hydrogen; Offshore wind; Decarbonization; DRI-H₂; Steelmaking;

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. Para alcançar essa meta, é essencial adotar uma profunda descarbonização, a qual se dará por meio da eletrificação, eficiência energética e uso de fontes renováveis, sobretudo o hidrogênio verde (H₂V) (IRENA, 2022b).

Ademais, o *Hydrogen Council* (2017) afirma que o hidrogênio (H₂) é o pilar central da transformação energética necessária para limitar o aquecimento global. Nessa perspectiva, estima-se que até 25% das emissões de gases do efeito estufa (GEE) poderiam ser reduzidas por meio do H₂ 2050 (WORLD BANK, 2022), o que pode representar até 80 gigatoneladas (GT) de GEE (HYDROGEN COUNCIL, 2022a).

A implantação de projetos e o desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio estão crescendo gradualmente, com progresso significativo nas etapas de produção e usos finais (HYDROGEN COUNCIL, 2022b). O setor privado anunciou mais de 1.500 projetos até meados de 2022 (IRENA, 2022g), o que indica um interesse global nas cadeias de valor de hidrogênio. Esse interesse se dá, uma vez que o H₂ poderá ajudar significativamente a descarbonizar setores difíceis de descarbonização, como a produção de ferro e aço (WORLD BANK, 2022).

Algumas tecnologias-chave de hidrogênio, como a redução direta do ferro por hidrogênio (DRI-H₂) para a fabricação de aço, ainda não estão disponíveis comercialmente. No entanto, o número de projetos de demonstração está aumentando, e espera-se que alguns se tornem disponíveis comercialmente em um período de médio prazo. Sobre o uso do DRI-H₂, um ano após o início da operação do primeiro projeto piloto, foram anunciados planos para o desenvolvimento de várias usinas DRI-H₂ em escala comercial, sobretudo na Europa (IEA, 2022a).

Considerando que, dentre todas as opções de eletricidade renovável, a energia eólica *offshore* tem o maior potencial para a produção de H₂V devido à competitividade econômica que pode ser alcançada por meio de suas constantes inovações tecnológicas e economia de escala (GWEC, 2021), surgiu o seguinte questionamento da pesquisa: **"Qual é o panorama internacional em relação ao desenvolvimento de projetos de produção de aço verde que utilizam hidrogênio verde proveniente da energia eólica *offshore*?"**. Diante disso, este artigo tem por objetivo analisar o cenário internacional de tecnologias e projetos de hidrogênio verde, produzido a partir da energia eólica *offshore*, voltados para a produção de aço verde por meio da redução direta do ferro (DRI-H₂).

O artigo está estruturado em cinco seções: a presente seção, seção 1, apresenta uma

contextualização sobre o tema, a seção 2 compreende o método da pesquisa; a seção 3 apresenta a fundamentação teórica sobre as temáticas de: eólica *offshore*, hidrogênio verde e aço verde; a seção 4 traz o estudo de caso de um projeto de produção de aço verde via DRI-H2 com o H₂ proveniente da eólica *offshore*; a seção 5 contempla a discussão dos resultados; e pôr fim a seção 6 apresenta as conclusões do estudo e recomendações.

2. MÉTODO DO ESTUDO

Cada pesquisa tem suas características, logo é necessário que elas sejam explicitadas para um melhor entendimento quanto aos seus propósitos, sua natureza, seu objetivo, sua abordagem, tipo de argumentação lógica e seu procedimento técnico (WILLIAMS, 2007; GONZÁLEZ; TOLEDO, 2012).

Este estudo é caracterizado como pesquisa aplicada, já que sua finalidade é identificar o cenário internacional relacionado ao desenvolvimento de projetos de produção de aço verde que utilizam o H₂V eletrolítico, produzido a partir da eólica *offshore*. Quanto à classificação dos objetivos, o estudo possui características exploratórias e descritivas. A característica exploratória se deu por meio da necessidade de um levantamento bibliográfico e documental e a descritiva pelo estabelecimento de correlações entre as variáveis encontradas. Por conseguinte, a pesquisa possui abordagem qualitativa, pois os objetos de estudo foram investigados de forma teórica. Dentre os procedimentos, os métodos de pesquisa bibliográfica e estudo de caso foram utilizados.

2.1 Procedimento da pesquisa

O procedimento da pesquisa se deu em duas etapas: (i) pesquisa teórica e (ii) estudo de caso. A (i) pesquisa teórica englobou uma revisão bibliográfica, utilizando como tema (a) eólica *offshore*; (b) hidrogênio verde; e (c) aço verde. A pesquisa foi realizada por meio de artigos científicos, obtidos por meio de buscas nas bases de dados Scopus e Science Direct, e relatórios técnicos divulgados por agências e empresas do setor.

Em uma segunda instância, foi realizado o (ii) estudo de caso, o qual consistiu em uma análise documental, e coleta de dados por meio de sites institucionais e relatórios técnicos. Para este estudo foi analisado o *Tees Green Hydrogen*, localizado no Reino Unido, uma vez que este é o projeto em fase mais avançada para esta tecnologia.

3. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A base teórica contempla os temas: eólica *offshore*, hidrogênio verde, aço verde e o panorama atual de mercado do aço verde.

3.1 Eólica *offshore*

A geração de eletricidade a partir da energia eólica pode ser explicada da seguinte forma: a energia cinética fornecida pelos ventos é transformada em mecânica, que, por sua vez, aciona um gerador de energia que transforma a energia mecânica em elétrica (ALLAMEHZADEH, 2016). Dentre os locais de instalação de parques eólicos, existem duas modalidades: *onshore*, cujo parque eólico é instalado dentro da costa continental, e *offshore*, instalado em ambiente marítimo. De acordo com o IRENA, estima-se que a capacidade instalada global acumulada em eólica *offshore* alcance aproximadamente 380 GW em 2030 e mais de 2.000 GW em 2050 (IRENA, 2021). Entre todas as fontes de energias renováveis, a eólica *offshore* é a modalidade de energia que apresenta fatores de capacidade médio anual mais altos, variando de 40 a 50% (GWEC, 2021), no entanto, em determinadas regiões, como no Brasil, pode ser superior a 60% (NUNES, 2020).

A média global do custo nivelado de energia eólica *offshore* (LCOE) para sistemas fixos e flutuantes são de US\$ 85/MWh e US\$ 132/MWh, respectivamente (STEHLI *et al.*, 2020). Não obstante, uma projeção de redução no LCOE de 35–49% e 17–40% para as turbinas eólicas *offshore* de fundação fixo e flutuante, respectivamente, é prevista para os anos de 2035 a 2050 (KUMAR *et al.*, 2022), atingindo custos menores que a eólica *onshore*. Em contrapartida com as projeções, em 2022, a energia eólica *offshore* atingiu valores menores que a eólica *onshore* no leilão de energia realizado no Reino Unido com

um valor de £37,35/MWh (aproximadamente US\$ 47,78/MWh) demonstrando um potencial de redução de custos da tecnologia ainda mais acelerado (TCE, 2022).

Apesar dos benefícios citados, há limitações na transmissão eficiente da eletricidade *offshore*, pois é necessário o uso de linhas de transmissão de alta tensão para transferência (GONDAL, 2019). Portanto, é conveniente a implementação de um vetor de energia sustentável para minimizar os impasses da transmissão de eletricidade.

3.2 Hidrogênio Verde

O hidrogênio é o elemento mais abundante no universo, encontrado principalmente na água e em compostos orgânicos (DAWOOD; ANDA; SHAFIULLAH, 2020). A cadeia de valor do hidrogênio verde consiste nas etapas de: produção, armazenamento, transporte e aplicações (EISILY *et al.*, 2022).

Conforme Nikolaidis e Poullikkas (2017), a produção do hidrogênio pode ser dividida em duas principais categorias: biomassa e divisão da água. De forma comercial, a rota mais comum utiliza como matéria prima a água, mais precisamente o processo de eletrólise. Este, consiste na decomposição eletroquímica da água em hidrogênio e oxigênio, por meio de uma corrente elétrica (GALITSKAYA; ZHDANEEV, 2022).

Sobre os sistemas de armazenamento, Hren *et al.* (2023), afirmam que existem dois métodos, sendo eles: (i) físico, que consiste na compressão, liquefação ou criocompressão; e (ii) químico, que consiste nos transportadores orgânicos líquidos (LOHCs) e hidretos metálicos. As formas de armazenamento mais utilizadas atualmente são o hidrogênio comprimido e líquido, geralmente transportados por vasos de alta pressão e tanques criogênicos. Ademais, a transformação do hidrogênio em outros portadores de energia, como amônia e metanol, é bastante mencionada atualmente (OLABI *et al.*, 2023).

Sobre o transporte, o hidrogênio pode ser transportado usando diferentes modais, incluindo dutos, rodovias, ferrovias e transporte marítimo (DONG *et al.*, 2022).

Em relação às aplicações, uma vez que o hidrogênio é um produto com grande versatilidade, possui diversas aplicações: (i) geração de energia elétrica por meio de células de combustível; (ii) injeção em rede de dutos (iii) aquecimento; utilização no setor de mobilidade/transporte e utilização no setor industrial (HU, 2020). Tratando-se das utilizações industriais, destacam-se os setores: químico, petroquímico, e siderúrgico, por meio da produção de materiais metálicos, ferro e aço através do método DRI-H2 (LOISEL, 2019).

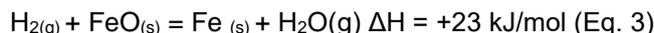
3.3 Aço Verde

Avanços tecnológicos recentes na siderurgia, juntamente com reduções de custos em tecnologias de energias renováveis, apontam que o setor siderúrgico possui potencial para reduzir significativamente suas emissões de gases de efeito estufa (VOGL, 2018; VOGL, 2021).

A maior parte da produção global de aço é realizada através da rota de Alto-forno/Forno Básico de Oxigênio (BF-BOF), a qual reduz o minério de ferro -hematita- (Fe_2O_3) a ferro metálico (Fe), utilizando coque e combustíveis fósseis. A rota do Forno de Arco Elétrico de Redução Direta (DR-EAF) é a principal alternativa à rota BF-BOF, onde o minério é reduzido a ferro diretamente (DRI) utilizando gás natural ou gás de síntese ($\text{H}_2 + \text{CO}$) (WANG *et al.*, 2021). De acordo com Rechberger *et al.* (2020), a substituição completa do gás natural por H_2 pode reduzir em 91% a quantidade de CO_2 emitido no processo e, termodinamicamente, a eficiência da redução do ferro usando hidrogênio é maior quando comparado a outros métodos. Logo, a tecnologia DRI-H2 tem sido considerada tecnicamente a mais promissora (LEDARI *et al.*, 2023).

O processo de redução DRI-H2 ocorre em três etapas. Primeiro a Hematita (Fe_2O_3) é convertida em Magnetita (Fe_3O_4) e nas etapas subsequentes, a Magnetita é convertida em Wüstita (FeO) e, finalmente, em ferro metálico (Fe), conforme as Equações 1, 2 e 3.





A tecnologia DRI-H2 está atualmente bem estabelecida com um Technology Readiness Level (TRL) de 6–8 (MIDREX, 2021).

3.4 Panorama atual do aço verde: Perspectivas do mercado

A produção de aço é altamente intensiva em uso de energia, cerca de 8% da demanda global, e em emissões de gases do efeito estufa, respondendo por e 7% (2,6 Gt CO₂) das emissões totais do sistema energético. Para atender às metas globais de energia e clima, as emissões da indústria siderúrgica devem cair em pelo menos 50% até 2050 (IEA, 2020). Ademais, a indústria siderúrgica desempenha um papel vital na economia global, com mais de US\$ 2,5 trilhões em receita e emprega cerca de 6 milhões de pessoas em todo o mundo (IEA, 2020).

A demanda global por aço está prevista para aumentar em mais de um terço até 2050, passando de 1,9 Gt em 2019 para mais de 2,5 Gt em 2050, sendo acrescida sobretudo pelo aço verde, o qual está previsto para representar 15% da produção até 2050. Nesse contexto, é esperado para o setor que o uso de fontes fósseis diminua em 40%, ao passo que o consumo de eletricidade dobre. Aproximadamente 30% dessa eletricidade, equivalente a cerca de 700 TWh, será direcionada à geração de hidrogênio eletrolítico, demandando cerca de 165 GW de capacidade de eletrolisadores em 2050 (IEA, 2020).

Considerando o aço verde, produzido pelo método DRI-H2, os custos atuais estimados de produção estão variando entre US\$ 650 e US\$ 715/ton, enquanto o custo do aço cinza é de US\$ 550/ton (IRENA, 2022e). Ao analisar os elementos de custo para cada tipo de aço, tem-se que a eletricidade é o principal custo do aço verde, seguido pelo minério de ferro. No caso do aço cinza, o minério de ferro é o elemento com maior custo, seguido pelo coque (MAYER *et al.*, 2018). No entanto, o mercado estima que os custos possam ser equiparados ou até menores em comparação ao aço cinza em um período de médio prazo, uma vez que os custos do H₂V e da eletricidade verde venham a diminuir.

No entanto, o mercado identifica diversos desafios para o desenvolvimento do setor, tais como: (i) garantir o suprimento de energia renovável, em grande quantidade; (ii) estabelecer regulamentações, incentivos e normas adequadas; (iii) assegurar a disponibilidade de minério de ferro de alta qualidade; (iv) contar com mão de obra qualificada e bens necessários; (v) obter financiamento adequado; e (vi) atender à demanda do mercado de *offtakers* (SHELL, 2022).

Além disso, para o setor avançar de maneira sólida, é essencial ter acesso à energia elétrica verde de baixo custo e em grande quantidade, seja por meio de H₂V para alimentar usinas DRI ou para suprir os sistemas elétricos. Nesse contexto, é importante ressaltar que, no caso do aço verde produzido por DRI-H₂, o custo da energia renovável representa entre 50% e 70% dos custos totais de produção (SHELL, 2022).

A produção DRI-H2 ainda está em um estágio inicial de desenvolvimento. O portfólio de projetos indica que até 2030, se todos os projetos planejados alcançarem suas metas anunciadas dentro do prazo, cerca de 1,8 Mt de capacidade de hidrogênio de baixa emissão para o processo DRI estará disponível (IEA, 2022a).

4. ESTUDO DE CASO: TESS VALLEY

O projeto *Tees Green Hydrogen* utilizará a eletricidade verde do parque eólico *offshore* Teesside, juntamente com um novo parque solar, como suprimento de eletricidade para a produção de hidrogênio eletrolítico. O projeto fornecerá hidrogênio para a descarbonização da indústria local, região de Tesside nordeste do Reino Unido, incluindo o setor siderúrgico. Em sua fase inicial, o eletrolisador terá de 30 a 50 MW e em fases posteriores estima-se que a capacidade de produção seja superior a 500 MW (BRITISH STEEL, 2022).

Ademais, a *British Steel* está conduzindo um estudo sobre o uso de hidrogênio verde no processo de produção do aço verde em colaboração com a EDF UK, UCL (*University College London*) e o MPI

(BRITISH STEEL, 2022). O projeto conta com um orçamento bruto total de £ 7,21 milhões e a data de comissionamento está prevista para abril de 2024 (BRITISH STEEL, 2022). O H2DRI, nome dado a fase 1 do projeto, consistiu no estudo de viabilidade, o qual foi finalizada em 2022. A fase 2 irá consistir na construção de uma planta piloto de produção de aço verde com mais de 1 tonelada por dia de capacidade e tem como título provisório 'HEIDI' (Hydrogen-Electric Iron & Steelmaking Demonstration and Innovation) (MPI, 2023).

A fase 1, revisou a maturidade técnica e a viabilidade econômica do uso de hidrogênio alcalino (ALK), membrana de troca de prótons (PEM) e célula de eletrolisador de óxido sólido (SOEC) para a produção do hidrogênio. Sob esse aspecto, a possibilidade de utilizar o calor 'residual' do forno de reaquecimento foi considerada, pois isso aumenta a eficiência da produção de hidrogênio SOEC no local em cerca de 20%. Ademais, o trabalho de modelagem identificou que a troca de combustíveis fósseis por hidrogênio pode aumentar a eficiência geral do forno de 50% para 61%. Além disso, ao mesmo tempo em que o rendimento é aumentado, existe uma redução significativa na formação de incrustações (BRITISH STEEL, 2022). De modo global, o estudo desse projeto encontra-se no TRL 5 com perspectivas de TRL 7 até o fim dos estudos (BRITISH STEEL, 2022). Ademais, a partir do estudo de viabilidade, foi constatado que a DRI-H2 não só é possível, como apresenta um tempo de processo menor e requer menos energia que a redução do ferro convencional, além de produzir um aço de alta pureza (MPI, 2023).

Do ponto de vista socioeconômico do projeto, criar e manter as cadeias de suprimentos industriais dentro do *Tees Valley* também terá um impacto positivo no número de empregos. Estima-se que, devido à disponibilidade e ao uso de hidrogênio, a região tem o potencial de gerar até 2.400 empregos na indústria e na sua cadeia de valor (TEES VALLEY E ARUP, 2022).

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir da análise realizada, é possível inferir que a descarbonização do setor siderúrgico tem se tornado uma tendência crescente nos últimos anos. Impulsionado pelo aumento de capacidade instalada das energias de fontes renováveis, dentre elas a eólica *offshore*, e com o objetivo de cumprir as metas de descarbonização propostas no acordo de Paris, o número de projetos dedicados a produção de aço via DRI-H2 tem aumentado. O alto investimento financeiro, tanto por parte dos governos quanto das empresas, tem impulsionado o desenvolvimento tecnológico e do mercado.

Como um requisito para que o mercado se desenvolva, é crucial que exista hidrogênio verde abundante e de baixo custo e eletricidade renovável barata, os quais serão viabilizados com a presença da eólica *offshore*, uma vez que essa fonte tem o maior potencial para a produção de H₂V e será a mais competitiva em um horizonte de curto e médio prazo.

Em relação à capacidade de produção dos projetos, destaca-se a produção em grande escala e a expectativa de comissionamento em curto e médio prazo. Além disso, os projetos, mesmo em escala piloto, que utilizam a tecnologia DRI-H2, têm demonstrado viabilidade técnica e apresentam vantagens em relação aos métodos convencionais. Sob esse aspecto, é pertinente mencionar o aumento da eficiência geral do forno, o menor tempo de processo, o menor aporte energético, o aumento da pureza e a redução das incrustações.

Quanto ao hidrogênio verde, que é um insumo para o processo de DRI, prevê-se a instalação de plantas de produção com alta capacidade em um período de médio prazo. Ademais, é importante destacar a menção da tecnologia de produção de SOEC, a qual tem apresentado significativos resultados, uma vez que reaproveita o calor residual do processo para melhorar a eficiência do sistema.

Além dos benefícios ambientais, como a mitigação das emissões de CO₂, a produção de aço verde também traz impactos socioeconômicos positivos, como a criação de milhares de empregos verdes nas regiões onde são implantados, e o impulsionamento do desenvolvimento da cadeia de suprimentos, tanto a nível local quanto internacional, promovendo a economia e a sustentabilidade da indústria.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os setores econômicos estão direcionando seus esforços para a descarbonização de suas atividades, com o objetivo de atingir as metas previstas pelo Acordo de Paris. Nesse contexto, o hidrogênio apresenta-se como o pilar central para o processo de transição energética.

Este estudo limitou-se a analisar o setor siderúrgico, responsável por 7% das emissões totais de CO₂ do sistema energético. Dessa forma, o objetivo desta pesquisa é analisar o cenário internacional de tecnologias e projetos de hidrogênio verde, produzido a partir da energia eólica *offshore*, voltados para a produção de aço verde por meio da redução direta do ferro.

No que se refere a produção de energia elétrica para produção de hidrogênio verde, pode-se concluir que a fonte eólica *offshore* é considerada a opção mais promissora, devido a que os projetos de parques eólicos *offshore* possuem grande escala de produção de energia elétrica (projetos com mais de 1 GW de capacidade instalada). No total, mais de 100 projetos na cadeia de valor do hidrogênio utilizam essa fonte como insumo de energia elétrica.

Quanto a rota de produção de hidrogênio verde, a eletrólise é considerada a mais promissora. No mundo já é possível observar projetos que produzirão H₂V em larga escala em um período de médio prazo. Na produção de aço verde sugere-se o destaque a tecnologia SOEC, uma vez que é possível reaproveitar o calor residual do processo de produção do aço, aumentando a eficiência da produção de H₂V.

Apesar dos projetos de produção de aço verde a partir da redução direta do ferro por hidrogênio (DRI-H₂) ainda estarem nos estágios iniciais (projeto piloto), algumas vantagens são observadas quando comparada a produção do aço cinza. São elas: aumento na eficiência global do forno; redução na formação de incrustações; menor tempo de processo; redução no consumo de energia; e produção de um aço de altíssima pureza.

Quanto aos custos do aço verde, mesmo apresentando um custo estimado cerca de 18% maior quando comparado ao aço cinza, estima-se que em um período de curto a médio prazo, com a redução nos custos do H₂V e da eletricidade de fonte renovável, o aço verde terá valor equiparado ou inferior ao aço produzido pela rota tradicional.

Ademais, o mercado de aço verde tem testemunhado um desenvolvimento significativo, refletido em altos investimentos, aumento do número de projetos em andamento e avanços tecnológicos para a tecnologia DRI-H₂, já que tem demonstrado diversas vantagens em relação ao método convencional e viabilidade técnica.

Assim, é observada uma tendência no desenvolvimento da cadeia de suprimentos local e global para o mercado de aço verde, com forte impulsionamento dos *offtakers*. Sobre os benefícios socioambientais, pode ser destacada a redução das emissões de CO₂ do setor, além da criação de milhares de empregos verdes nas regiões onde são implantados, contribuindo para o desenvolvimento econômico e social.

Por fim, a análise dos projetos identificou lacunas que requerem estudos futuros para impulsionar o setor. São elas: (i) Detalhamento das variáveis técnicas operacionais; (ii) Planejamento de operação e manutenção de projetos; (iii) Análise econômica de projetos de produção de aço verde; (iv) Modelos de certificação para aço verde; (v) diretrizes para o desenvolvimento do mercado de aço verde.

Portanto, é possível inferir que o mercado do aço verde está em fase de planejamento e se prepara para uma expansão significativa nos próximos anos. Nesse sentido, a compreensão e o acompanhamento dos projetos piloto desempenharão um papel fundamental no desenvolvimento e aprimoramento desse mercado em ascensão.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking.** Paris: IEA, 2020. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/eb0c8ec1-3665-4959-97d0-187ceca189a8/Iron_and_Steel_Technology_Roadmap.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA (IEA). **Global Hydrogen Review 2022**. França: IEA, 2022a. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2022

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (IRENA). **Accelerating hydrogen deployment in the G7: Recommendations for the Hydrogen Action Pact**. Abu Dhabi: IRENA, 2022g. Disponível em: https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdnendpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Nov/IRENA_Hydrogen_deployment_G7_2022.pdf?rev=ef39150b82754588b2f31bd5afc74c01. Acesso em: 15 mar. 2023

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (IRENA). **Green hydrogen for industry: A guide to policy making**. Abu Dhabi: IRENA, 2022e. Disponível em: irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_Green_Hydrogen_Industry_2022.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (IRENA). **Offshore Renewables: An Action Agenda for Deployment**. Abu Dhabi: IRENA, 2021. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jul/IRENA_G20_Offshore_renewables_2021.pdf?rev=9e3ad6549dd44dc9aaaaedae16b747bb. Acesso em 05 de jul. 2023.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIAS RENOVÁVEIS (IRENA). **WORLD ENERGY TRANSITIONS OUTLOOK 2022: 1.5°C Pathway**. Abu Dhabi: IRENA, 2022b. Disponível em: irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2022.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023

ALLAMEHZADEH, Hamid. Wind energy history, technology and control. In: **2016 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)**. IEEE, 2016. p. 119-126.

BRITISH STEEL. **Desktop Feasibility Study: Green Hydrogen in Steel Manufacture**. Reino Unido: British Steel, 2022. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1165564/British_Steel_-_Green_Hydrogen_in_Steel_Manufacture_-_IFS_Feasibility_Report_.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023

DAWOOD, Furat; ANDA, Martin; SHAFIULLAH, G. M. Hydrogen production for energy: An overview. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 7, p. 3847-3869, 2020.

DONG, Zhao Yang et al. A green hydrogen credit framework for international green hydrogen trading towards a carbon neutral future. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 2, p. 728-734, 2022.

ESILY, R. R. et al. Hydrogen strategy in decarbonization era: Egypt as a case study. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 43, p. 18629-18647, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.012>.

GALITSKAYA, Elena; ZHDANEEV, Oleg. Development of electrolysis technologies for hydrogen production: A case study of green steel manufacturing in the Russian Federation. **Environmental Technology & Innovation**, v. 27, p. 102517, 2022.

GONDAL, Irfan Ahmad. Offshore renewable energy resources and their potential in a green hydrogen supply chain through power-to-gas. **Sustainable Energy & Fuels**, v. 3, n. 6, p. 1468-1489, 2019.

GONZÁLEZ, M. O. A.; DE TOLEDO, J. C. Customer integration in the product development process: A systematic bibliographic review and themes for research. **Producao**, v. 22, n. 1, p. 14-26, 2012.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). **Global Offshore Wind Report 2021**. Global Wind Energy Council. Bruxelas: GWEC, 2021. Disponível em: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/09/GWEC-Global-Offshore-Wind-Report-2021.pdf>. Acesso em 17 jun. 2021.

HREN, Robert et al. Hydrogen production, storage and transport for renewable energy and chemicals: An environmental footprint assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 173, p. 113113, 2023

HU, Guoping et al. A review of technical advances, barriers, and solutions in the power to hydrogen (P2H) roadmap. **Engineering**, 2020.

HYDROGEN COUNCIL. **Global Hydrogen Flows**: Hydrogen trade as a key enabler for efficient decarbonization. Brussels: Hydrogen Council, McKinsey & Company, 2022a. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/10/GlobalHydrogen-Flows.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2023.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Insights 2022**: An updated perspective on hydrogen market development and actions required to unlock hydrogen at scale. Brussels: Hydrogen Council, McKinsey & Company, 2022b. Disponível em: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/09/Hydrogen-Insights-2022-2.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2023.

HYDROGEN COUNCIL. **Hydrogen Scaling Up**: A sustainable pathway for the global energy transition. Brussels: Hydrogen Council, McKinsey & Company, 2017. Disponível em: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scalingup_Hydrogen-Council_2017.compressed.pdf. Acesso em 01 jun. 2021.

KUMAR, Sumit et al. Synergy of green hydrogen sector with offshore industries: Opportunities and challenges for a safe and sustainable hydrogen economy. **Journal of Cleaner Production**, p. 135545, 2022.

LEDARI, Masoumeh Bararzadeh et al. Greening steel industry by hydrogen: Lessons learned for the developing world. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2023.

LOISEL, Rodica et al. Green hydrogen multi-market optimisation: real complementarities or temporary transaction costs?. In: **2019 Offshore Energy and Storage Summit (OSES)**. IEEE, 2019. p. 1-10.

MATERIALS PROCESSING INSTITUTE (MPI). **H2DRI Pilot Project Public Report**. Middlesbrough: MPI, 2023. Disponível em: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1165639/Materials_Processing_Institute_-_Hydrogen_Direct_Reduction_of_Iron_pilot_furnace_and_steelmaking_H2DRI_pilot_-_IFS_Feasibility_Report.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023.

MAYER, Jakob; BACHNER, Gabriel; STEININGER, Karl W. Macroeconomic implications of switching to process-emission-free iron and steel production in Europe. **Journal of Cleaner Production**, v. 210, p. 1517-1533, 2019.

MIDREX TECHNOLOGIES, INC. **Arcelor Mittal Hamburg**: leading another ironmaker renaissance. Disponível em: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/Midrex-DFM-1stQtr2021-Final.pdf>. Acesso em 01 de jul. 2023.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LAB (NREL). **2019: Cost of Wind Energy Review**. Estados Unidos: NREL, 2020. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/78471.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2023.

NIKOLAIDIS, P.; POULLIKKAS, A. A comparative overview of hydrogen production processes. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 67, p. 597-611, 2017.

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

OLABI, A. G. et al. Recent progress in Green Ammonia: Production, applications, assessment; barriers, and its role in achieving the sustainable development goals. **Energy Conversion and Management**, v. 277, p. 116594, 2023.

SHELL. **Decarbonising Steel**: FORGING NEW PATHS TOGETHER. Londres: Shell, 2022. Disponível em: https://www.shell.com/shellenergy/marketingandtrading/jcr_content/root/main/section/simple/promo_213_0259397/links/item0.stream/1669392117011/5b1f673472d02633f82125fef387d13c266a454d/shell-decarbonising-steel-digital.pdf. Acesso em: 07 jul. 2023.

TCE, **Offshore Wind Report 2022**. Disponível em: <https://www.thecrownestate.co.uk/media/4378/final-published_11720_owoperationalreport_2022_tp_250423.pdf>. Acesso em: 29 de jun. de 2023.

TEES VALLEY. **A vision for hydrogen in the Tees Valley**. Reino Unido: Tess Valley, 2022. Disponível em: <https://www.arup.com/-/media/arup/files/publications/t/tees-valley-vision-for-hydrogen.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2023

VOGL, Valentin; ÅHMAN, Max; NILSSON, Lars J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. **Journal of cleaner production**, v. 203, p. 736-745, 2018.

VOGL, Valentin; OLSSON, Olle; NYKVIST, Björn. Phasing out the blast furnace to meet global climate targets. **Joule**, v. 5, n. 10, p. 2646-2662, 2021.

WANG, R. R. et al. Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 329, p. 129797, 2021.

WILLIAMS, C. **Research methods. Journal of Business & Economic Research**, v. 5, n. 3, p. 65–72, 2007.

WORLD BANK. **Sufficiency, sustainability, and circularity of critical materials for clean hydrogen.**

Washington: World Bank, 2022. Disponível em:

<https://documents1.worldbank.org/curated/en/099340012132232793/pdf/P1740030a03d520a60a5570f776c34e1701.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2023

Utilização da Técnica CFD para Análise da Eficiência Aerodinâmica de Turbina Eólica de Eixo Vertical Empregando Diferentes Valores de Solidez

Luisa Felix de Araujo Souza¹, Luiz Justino da Silva Junior¹

¹ Universidade Federal do Oeste da Bahia

luisa.s3294@ufob.edu.br, luiz.silva@ufob.edu.br

RESUMO

A energia eólica se estabeleceu em um cenário global de transição energética diante do esgotamento dos combustíveis fósseis e das mudanças climáticas. À vista disso, a extração de energia cinética do vento é realizada por meio dos aerogeradores ou turbinas eólicas que são classificadas de acordo ao eixo de acionamento mecânico: Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH) e Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV). Quanto ao TEEV, o modelo H-rotor Darrieus ou Darrieus-H se destaca na comunidade científica como o mais eficiente para ambientes urbanos, podendo extrair mais energia do vento por área varrida em relação ao TEEH. Nesta perspectiva, este trabalho utiliza a técnica CFD (Fluidodinâmica Computacional) para analisar em regime transiente o escoamento de ar sobre as pás de uma turbina eólica Darrieus-H de pequeno porte com dimensões baseadas em um modelo real empregando diferentes valores de solidez, para isso, o método adotado é subdividido em etapas de pré-processamento, processamento e pós-processamento. O software ANSYS é utilizado para simular por meio de testes virtuais o modelo escolhido de perfil de aerofólio assimétrico DU-06-W-200 em um domínio computacional bidimensional com regiões estacionárias e rotativas e velocidade do vento de entrada a 6 m/s. Com essa finalidade, o Método dos Volumes Finitos e o modelo de turbulência k- ω SST são adotados para obtenção da solução numérica. Posteriormente, são obtidos no pós-processamento da simulação os coeficientes aerodinâmicos de potência que indicarão a configuração geométrica com maior eficiência aerodinâmica através dos parâmetros de solidez e razão de velocidade de ponta de pá.

Palavras-chaves:

H-rotor Darrieus; Fluidodinâmica Computacional; Turbina Eólica de Pequeno Porte.

ABSTRACT

Wind energy has established itself in a global scenario of energy transition in the face of the depletion of fossil fuels and climate change. Given this, the extraction of kinetic energy from the wind is carried out by means of wind turbines are classified according to the mechanical drive shaft: Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) and Vertical Axis Wind Turbine (VAWT). As for VAWT, the H-rotor Darrieus or Darrieus-H model stands out in the scientific community as the most efficient for urban environments, being able to extract more energy from the wind per swept area compared to HAWT. In this perspective, this work uses the CFD (Computational Fluid Dynamics) technique to transiently analyze the airflow over the blades of a small Darrieus-H wind turbine with dimensions based on a real model employing different solidity values. The ANSYS software is used to simulate through virtual tests the chosen model of asymmetric airfoil profile DU-06-W-200 in a two-dimensional computational domain with stationary and rotating regions and input wind speed at 6 m/s. For this purpose, the Finite Volume Method and the k- ω SST turbulence model are adopted to obtain the numerical solution. Subsequently, the power coefficients aerodynamic are obtained in the

post-processing of the simulation, which will indicate the geometric configuration with greater aerodynamic efficiency through the solidity parameters and blade tip speed ratio.

Keywords:

H-rotor Darrieus; Computational Fluid Dynamics; Small Wind Turbine.

1. INTRODUÇÃO

A solução para garantir a segurança energética e redução dos impactos ocasionados pelas alterações climáticas será através da aceleração da transição energética de fontes fósseis para energias renováveis, na qual, a energia eólica se consolida nessa perspectiva de diversificação da matriz energética diante o recurso ilimitado do vento.

Os aerogeradores ou turbinas eólicas podem ser classificadas de acordo a posição do eixo de acionamento mecânico em relação ao solo, desse modo, Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH) e Turbina Eólica de Eixo Vertical (TEEV). Atualmente, a TEEH representa o modelo que possui a maioria dos investimentos comerciais devido a sua melhor eficiência energética, por esse motivo, são amplamente utilizadas em parques eólicos em todo o mundo, no entanto, apesar da conscientização pública da importância de utilizar fontes sustentáveis de energia, esse modelo apresenta questões relacionadas a poluição sonora e visual o que o torna incompatível para ambiente urbano (KUMAR et al., 2018).

As turbinas eólicas de eixo vertical são projetadas para captar o vento de baixa intensidade e se adaptar as condições de escoamento turbulento característico das regiões urbanas com as vantagens de operar com baixo ruído, serem esteticamente atraentes e facilmente integradas em edifícios, além do mais, são capazes de extrair mais energia do vento por unidade de área varrida comparada a turbina eólica de eixo horizontal (KUMAR et al., 2018).

Apesar de serem idealizadas para as áreas urbanas, ainda há desafios relacionados a melhoria do desempenho aerodinâmico das turbinas eólicas de eixo vertical. Por esse motivo, ferramentas computacionais são amplamente utilizadas para o desenvolvimento de modelos mais eficientes e de maneira complementar a testes experimentais sendo a fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) uma técnica aplicada para avaliar o comportamento do escoamento do ar sobre as pás eólicas visando melhores coeficientes aerodinâmicos de acordo a variação de parâmetros no projeto, tais como, perfis de aerofólios, solidez e velocidade de ponta de pá.

Nessa perspectiva, o objetivo geral desse trabalho é investigar as melhores configurações de pás de turbinas eólicas de eixo vertical empregando diferentes valores de solidez através da técnica CFD para se obter uma análise de como esse parâmetro influencia a eficiência aerodinâmica.

2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL

Apesar das perspectivas favoráveis ao setor eólico, na rede de transmissão e distribuição dos parques eólicos existem perdas significativas de energia reduzindo a oferta de eletricidade aos consumidores finais. Dessa forma, uma alternativa é aplicação de turbinas eólicas de pequeno porte para o abastecimento energético de residências, iluminação pública, pequenos centros de telecomunicações e regiões de difícil acesso à conexão de rede (KC et al., 2019).

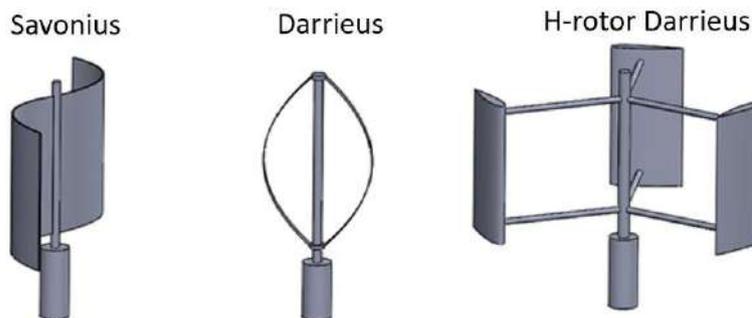
Nas áreas rurais ou no mar, onde ocorre a implementação das grandes turbinas eólicas atualmente, os territórios são abertos e livres de obstáculos, características que influenciam nas condições de vento, sendo estes, constantes e de alta intensidade. Todavia, as condições ambientais nas áreas urbanas e suburbanas são complexas e se constituem de ventos de baixa intensidade e turbulentos devido à presença de construções. Em virtude disso, as turbinas eólicas devem possuir um menor diâmetro do rotor para que não haja interferência com o perfil de velocidade vertical do vento. (KC et al., 2019).

A turbina eólica de eixo vertical tende a ser mais compacta e ocupar menos espaço em comparação com a turbina de eixo horizontal tornando possível a instalação em locais onde o espaço é limitado, como áreas urbanas ou terrenos com restrições de tamanho (KUMAR et al., 2018). A vista disso, A TEEV é classificada em dois grupos principais: Savonius e Darrieus. Respectivamente, a Savonius possui geometria semelhante a um S em virtude ao posicionamento das pás, nas quais existe o predomínio

da força aerodinâmica de arrasto na superfície, além do mais, detém baixa velocidade de corte (KUMAR et al., 2018).

O rotor Darrieus possui geometria diversificada, composta por duas ou três pás com formato curvo ou reto, comprimento de corda constante e baixo custo de construção. O princípio de extração da energia cinética do vento é baseado na força aerodinâmica de sustentação, possui um melhor aproveitamento por área varrida e um maior desempenho, entretanto, para esse modelo é necessário um mecanismo externo de auto partida devido ao baixo torque inicial (KUMAR et al., 2018). Uma variação da turbina Darrieus é H-rotor e os principais modelos de turbinas eólicas de eixo vertical são visualizados conforme a Figura 1.

Figura 1: Principais modelos de TEEV.



Fonte: Adaptado de Jain e Saha (2020).

Uma das principais vantagens da TEEV é a capacidade de aproveitar o vento proveniente de qualquer direção, o que a torna especialmente útil em áreas com ventos instáveis ou com mudanças frequentes de direção. Além disso, a ausência de mecanismos de guinada simplifica o projeto e a operação da turbina, reduzindo custos e aumentando a confiabilidade (TJIU et al., 2015; DU et al., 2019).

2.2 PARÂMETROS DE PROJETO

O principal parâmetro para a análise da eficiência de uma turbina eólica de eixo vertical é o coeficiente de potência (C_p), o qual avalia a eficiência energética do rotor eólico a partir do aproveitamento da potência mecânica extraída pela turbina da quantidade de potência disponível do vento e é dado pela Equação (1) (HANSEN et al., 2021):

$$C_p = \frac{P}{(1/2) \cdot \rho \cdot A \cdot R \cdot U_\infty^3} \quad (1)$$

onde P é a potência da turbina, ρ a massa específica do fluido, A a área varrida pelas pás eólicas, R o raio do rotor e U_∞ a velocidade do fluido. (HANSEN et al., 2021).

Além do mais, o coeficiente de potência possui variáveis de influência no desempenho do rotor eólico, sendo estes, o número de Reynolds (R_e) do escoamento livre, aerofólio, a razão da velocidade de ponta de pá (λ) e a solidez da turbina (σ). Desse modo, o C_p também pode ser expresso pela Equação (2) (MEANA-FERNÁNDEZ et al., 2018):

$$C_p = f\{R_e, \lambda, \sigma, \text{aerofólio}\} \quad (2)$$

sendo λ dado pela Equação (3) (JAIN e SAHA, 2020):

$$\lambda = \frac{\omega_r \cdot R}{U_\infty} \quad (3)$$

2.2.1 Solidez

A solidez (σ) é um importante parâmetro para definir a geometria da turbina e sua capacidade de autopartida, ademais, detém influência no desempenho da extração de energia cinética do vento e refere-

se a uma relação entre o número de pás (N), o comprimento de corda do perfil de pá (c) e o raio do rotor eólico (R), para tal, é definida pela Equação (4) (SAGHARICHI et al., 2018):

$$\sigma = \frac{N \cdot c}{R} \quad (4)$$

2.3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A fluidodinâmica computacional (CFD) é uma área de estudos dedicada a análise do comportamento e propriedades de escoamentos de fluidos a partir da simulação numérica, nos quais as características físicas em um regime sem transferência de calor são descritas através das equações de movimento na forma diferencial e são discretizadas em equações algébricas através da aplicação do Método de Volumes Finitos, além disso, para escoamentos turbulentos devido à complexidade são implementados modelos de turbulência nos *softwares* que utilizam a técnica CFD.

2.3.1 Equações Governantes

As equações governantes são as equações de movimento na forma diferencial que irão descrever o escoamento de fluido sendo definidas como: a Equação da Continuidade e a Equação de Navier-Stokes. Respectivamente, a primeira descreve o princípio da conservação de massa, para tal, avalia a taxa de variação de massa dentro de um volume de controle (TU et al., 2013) e é dada pela Equação (5):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (5)$$

em que ρ corresponde a massa específica do fluido, t o instante de tempo, $\vec{\nabla}$ o vetor gradiente e \vec{V} o vetor velocidade nas direções x , y e z .

A Equação de Navier-Stokes é derivada da 2ª Lei de Newton e descreve a conservação da quantidade de movimento de fluido devido as forças externas de superfície e de corpo (TU et al., 2013) sendo definida pela Equação (6):

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} \right] = -\vec{\nabla} P + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (6)$$

em que P corresponde ao campo de pressão, \vec{g} o vetor da aceleração da gravidade e μ a viscosidade dinâmica do fluido.

2.3.2 Método dos Volumes Finitos

O método dos volumes finitos (*Finite Volume Method – FVM*) é um método numérico empregado para a discretização das equações governantes na forma diferencial em equações algébricas lineares através da divisão do domínio computacional em um número finito de volumes de controle (elementos), nos quais em cada centroide serão obtidas as soluções numéricas das variáveis dependentes a cada elemento (TU et al., 2013).

Devido a sua característica conservativa, o FVM é método mais aplicado a técnica CFD sendo formulado para malhas estruturadas e não estruturadas, ademais, as condições de contorno são estabelecidas facilmente e detém uma variedade de aplicações envolvendo escoamentos de fluidos, transferência de massa e calor (MOUKALLED et al., 2016).

2.3.3 Modelo de Turbulência

No escoamento turbulento existe uma grande faixa de comprimento de vórtices além de altos números de Reynolds em que as forças inerciais são muito maiores do que os efeitos viscosos ocasionando flutuações aleatórias no fluido. Nesse contexto, seria necessário um grande poder

computacional para obtenção da solução numérica por meio da Equação de Navier-Stokes, portanto é fundamental adotar-se um método de obtenção de média das variáveis das equações governantes descartando as oscilações instantâneas (TU et al., 2013).

A abordagem adotada para avaliar o comportamento do fluido devido as flutuações encontradas nas variáveis das equações governantes é o U-RANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes) sendo o modelo de turbulência mais adequado o modelo $\kappa - \omega$ SST visto que detém concordância com os resultados obtidos experimentalmente e se caracteriza como um modelo estável e confiável demonstrando melhor desempenho comparado ao modelo de turbulência avaliado $\kappa - e$, no qual a solução numérica não convergiu e de maneira distinta aos resultados experimentais (BALDUZZI et al., 2016).

2.4 MALHA E CAMADA-LIMITE

A malha consiste em uma grade estruturada ou não-estruturada de volumes de controle (elementos finitos) no domínio computacional. Configura-se como a segunda etapa no pré-processamento da fluidodinâmica computacional (CFD) sendo desenvolvida após a criação do modelo geométrico em que será analisado as propriedades físicas do escoamento de fluidos (TU et al., 2013).

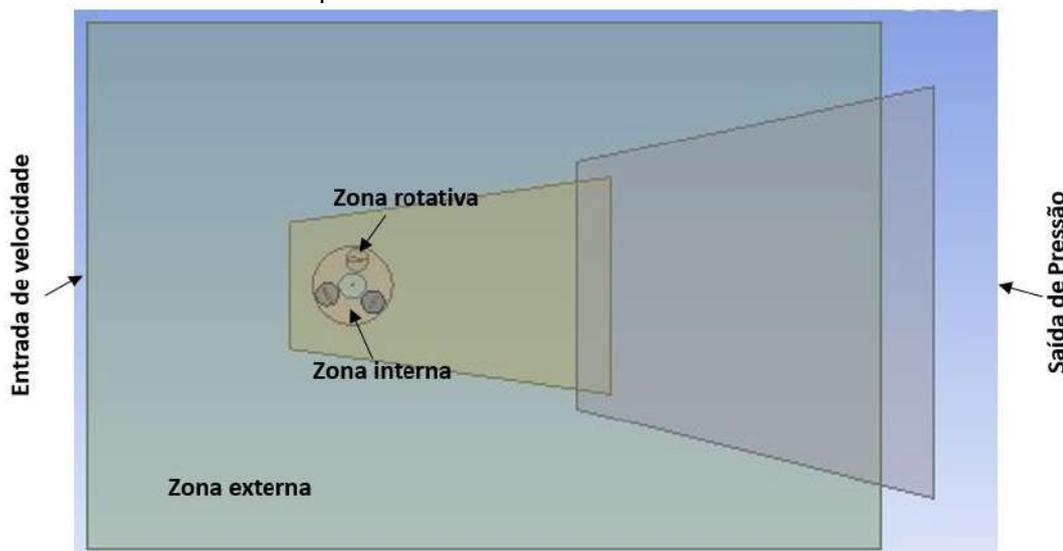
Para a implementação da técnica CFD é importante a divisão em subdomínios menores visto que a precisão da solução numérica é influenciada pela quantidade de elementos na malha. Todavia, essa configuração exige grande poder computacional que influenciam nos custos da simulação sendo necessário a otimização e a escolha de configurações adequadas que possam gerar resultados satisfatórios (TU et al., 2013).

A vista disso, a camada limite é uma região fina próxima as paredes da geometria nas quais os efeitos viscosos são considerados, por esse motivo, é essencial que nessa região seja estabelecida condições que a tornem suficientemente refinadas para a análise do escoamento de fluido. (ÇENGEL et al., 2015).

3. MÉTODO DO ESTUDO

Essa metodologia consiste na análise de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus-H através do parâmetro de solidez, para tal, são efetuadas simulações computacionais aplicando-se a técnica CFD por meio do *software* ANSYS FLUENT na versão estudantil. O método adotado para essa análise será subdividido em etapas de pré-processamento, processamento e pós processamento, respetivamente. Para a primeira, têm como embasamento científico os modelos computacionais implementados por Sagharichi et al. (2018) e Zhang et al. (2021). A Figura 2 ilustra o modelo do domínio computacional para a análise do escoamento de ar sobre as pás eólicas e das propriedades do fluido. Adicionalmente, O domínio foi elaborado com base em abordagem de Ahmed e Awais (2022).

Figura 2: Modelo do domínio computacional.



Fonte: Autor (2023).

As dimensões da turbina eólica Darrieus-H serão definidas com embasamento no modelo em desenvolvimento no Laboratório Didático de Engenharia Mecânica no campus de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia. A Tabela 1 resume as configurações geométricas aplicadas ao domínio computacional.

Tabela 1: Configurações aplicadas ao domínio computacional.

Diâmetro do rotor (m)	0,320
Número de pás	3
Perfil de aerofólio	Du-06-W-200
Corda do perfil de pá (m)	0,104

Fonte: Autor (2023).

Todavia, para a análise de solidez as dimensões da corda do perfil da pá eólica irão variar em relação a esse parâmetro para prever a melhor eficiência energética do rotor eólico de acordo a configuração geométrica estabelecida. Essa relação é obtida através da Equação (4) e apresentada pela Tabela 2.

Tabela 2: Solidez variando em função da corda do perfil de pá

Solidez	Corda do perfil de pá (m)
1,0	0,053
1,5	0,080
2,0	0,104
2,5	0,131

Fonte: Autor (2023).

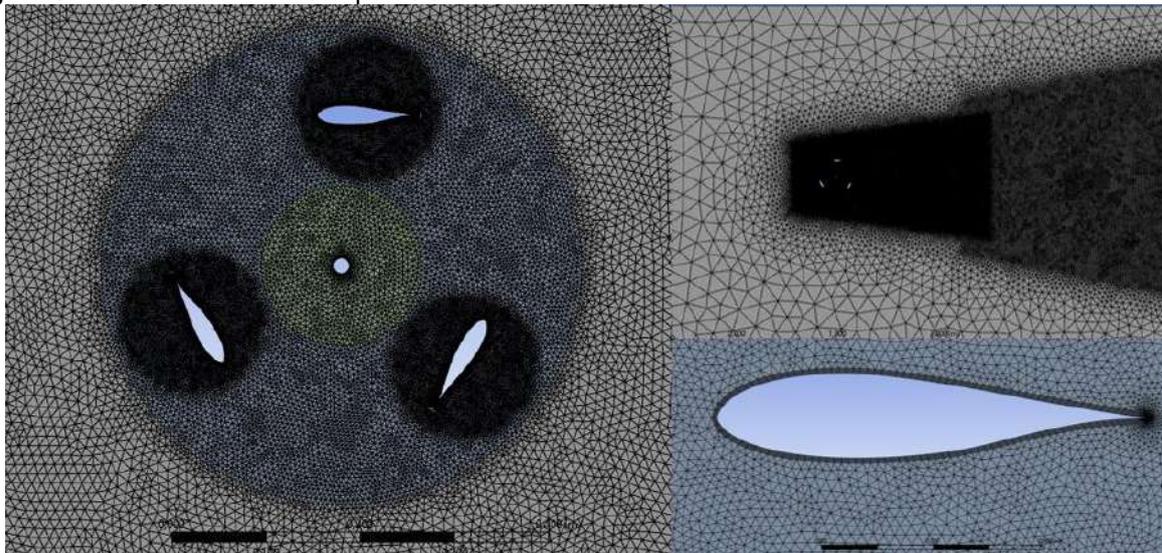
A análise de solidez é uma consideração importante no projeto de turbinas eólicas, pois está relacionada à eficiência energética do rotor. A solidez é definida como a relação entre a área de varredura (área projetada pela rotação das pás) e a área frontal do rotor. Na Tabela 2, são apresentadas as relações entre a solidez e a corda do perfil da pá eólica. Conforme a tabela, diferentes valores de solidez são alcançados variando a corda do perfil da pá (ZHANG et al, 2021).

Para uma solidez de 1, a corda do perfil da pá é de 0,053 m. À medida que a solidez aumenta, a corda também aumenta. A exemplo, para uma solidez de 1,5, a corda é de 0,080 m, para uma solidez de 2, a corda é de 0,104 m, e assim por diante. Essa relação entre solidez e corda do perfil da pá é importante para prever a eficiência energética do rotor eólico. A solidez afeta o desempenho aerodinâmico da turbina, sendo que valores mais altos de solidez geralmente levam a uma maior eficiência, mas também podem aumentar a resistência ao vento (SAGHARICHI et al, 2018).

Portanto, a escolha da corda do perfil da pá deve ser cuidadosamente analisada em relação à solidez desejada, visando otimizar o desempenho da turbina. Essa relação entre solidez e corda do perfil da pá é uma ferramenta importante para ajustar as características aerodinâmicas da turbina eólica, permitindo encontrar a configuração geométrica mais eficiente em termos de geração de energia (ZHANG et al, 2021).

Em seguimento, para a discretização das equações governantes no domínio computacional será desenvolvida a malha de maneira adaptativa para cada região. Em vista disso, para o subdomínio retangular estacionário (zona externa) será gerada uma malha não-estruturada com elementos trapezoidais que serão refinados nas regiões próximas ao rotor eólico e de esteira aerodinâmica com objetivo de diminuir a quantidade de elementos necessários e minimizar a demanda computacional. Assim como, no subdomínio circular rotativo (zona rotativa) será implementado o mesmo padrão de malha, porém com um refinamento ainda maior na camada limite por ser a região próxima à parede do aerofólio. A Figura 3 ilustra a malha criada para o domínio computacional com as configurações descritas.

Figura 3: Malha do domínio computacional.



Fonte: Autor (2023).

Para a criação da malha do domínio computacional foram utilizados, em média, 97 mil elementos, para tal, a validação da qualidade é obtida por meio do critério denominado *Skewness*, o qual define para esse objetivo um intervalo entre 0 e 1, em que, quanto mais próximo a 0, maior a qualidade. Em vista disso, a malha desenvolvida possui seu critério no valor de 0,0599, sendo assim, possui valor desejável de qualidade.

Após a geração da malha serão estabelecidas as condições de contorno e propriedades do fluido em escoamento por meio do ANSYS FLUENT (versão estudante). Nota-se pela Tabela 3 as configurações de contorno definidas assim como as propriedades do ar.

Tabela 3: Condições de contorno e propriedades do ar.

Velocidade do fluido (m/s)	6
Pressão manométrica de Saída (kPa)	0
Massa específica do ar (kg/m^3)	1,225
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	$1,7894 \cdot 10^{-5}$

Fonte: Autor (2023).

Na simulação computacional da turbina eólica, é necessário definir as condições de contorno e as propriedades do ar para obter resultados precisos. A Tabela 3 apresenta as configurações de contorno e as propriedades do ar definidas para o estudo. A velocidade do fluido é especificada como 6 m/s. Essa velocidade representa a velocidade do vento incidente na turbina eólica. É um parâmetro importante, pois influencia diretamente o desempenho e a geração de energia da turbina. Uma velocidade de 6 m/s é uma condição típica para análises e simulações de turbinas eólicas (ZHANG et al, 2021).

A pressão manométrica de saída é definida como 0 kPa. Essa condição de contorno representa uma saída de pressão, onde o ar deixa o domínio computacional. A pressão manométrica de 0 kPa indica que não há restrição ou contrapressão no ponto de saída (SAGHARICHI et al, 2018).

As propriedades do ar são especificadas como massa específica de 1,225 kg/m^3 e viscosidade dinâmica de $1,7894 \times 10^{-5}$ Pa.s. Essas propriedades são essenciais para modelar o comportamento do ar dentro do domínio da simulação. A massa específica está relacionada à densidade do ar, enquanto a viscosidade dinâmica representa a resistência do ar ao fluxo (SAGHARICHI et al, 2018).

Ao definir essas condições de contorno e propriedades do ar, é possível realizar a simulação computacional e obter informações sobre o comportamento do fluxo de ar ao redor da turbina eólica. Esses dados são cruciais para avaliar o desempenho aerodinâmico da turbina, incluindo a eficiência de geração de energia e outros parâmetros relevantes (ZHANG et al, 2021).

3.1 PROCESSAMENTO

A princípio, serão definidas as configurações que serão adotadas para a obtenção da solução numérica. Em vista disso, deverá ser realizada uma pré análise com um regime permanente nas zonas de células denominado *Moving Frame of Reference* para a verificação da convergência da solução numérica. Com essa confirmação, o escoamento deverá ser novamente configurado para um regime transiente através do *Sliding Mesh Feature* que consiste em um método mais preciso para simular fluxos rotativos e pode descrever corretamente o regime que varia em função do tempo.

A solução numérica é resolvida através de métodos baseados na densidade ou na pressão. No entanto, os efeitos da compressibilidade são quase nulos devido aos baixos valores do número de Mach no escoamento, somado a isso, a abordagem por meio da densidade exige resíduos muito baixos e passos angulares muito curtos para ser preciso, tornando essa abordagem não vantajosa para a análise da turbina eólica Darrieus-H, desse modo, será utilizado o modelo baseado na pressão que possui maior estabilidade e convergência mais rápida (BALDUZZI et al., 2016).

Em sequência, o algoritmo para resolver o esquema de acoplamento pressão-velocidade será o SIMPLE – *Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations* e o modelo de turbulência escolhido será o $k - \omega - SST$, ambos são utilizados por Balduzzi et al. (2016) e Zhang et al (2021) sendo que o modelo de turbulência detém estabilidade e confiabilidade nos resultados encontrados estando de acordo as testes experimentais conforme os pesquisadores.

No que tange ao critério de convergência da solução entre as iterações, está é estimada em um valor residual de 1.10^{-6} como utilizado por Zhang et al (2021). Essa definição é importante para a inicialização do cálculo e obtenção de uma solução numérica precisa.

3.2 PÓS-PROCESSAMENTO

Após a obtenção da solução numérica na etapa de processamento, serão obtidos no pós-processamento os coeficientes de potência médio para uma faixa de velocidade de ponta de pá (λ) que variará de 1 a 2,5 com intervalos de 0,5. Após isso, será analisado qual configuração geométrica oferece a melhor eficiência aerodinâmica avaliando o critério de solidez.

Para tal finalidade, é criado um parâmetro no *software* que representa a velocidade angular na região rotativa em função da faixa da razão da velocidade de ponta de pá (TSR) escolhida para análise conforme visualizado pela Tabela 4. Somado a isso, o passo angular do rotor eólico foi parametrizado para corresponder a variação da velocidade angular.

Tabela 4: Velocidade angular da região rotativa em função do TSR.

TSR	Velocidade angular (rad/s)	Passo de tempo Angular
1,0	37,5	0,0004654
1,5	56,25	0,0003103
2,0	75	0,0002327
2,5	93,75	0,0001862

Fonte: Autor (2023).

Além disso, também serão obtidos os contornos de velocidade e pressão do escoamento de ar em regime transiente para verificação dos fenômenos físicos nas regiões do domínio computacional e em torno das pás eólicas, tais como, as regiões de baixa e alta pressão.

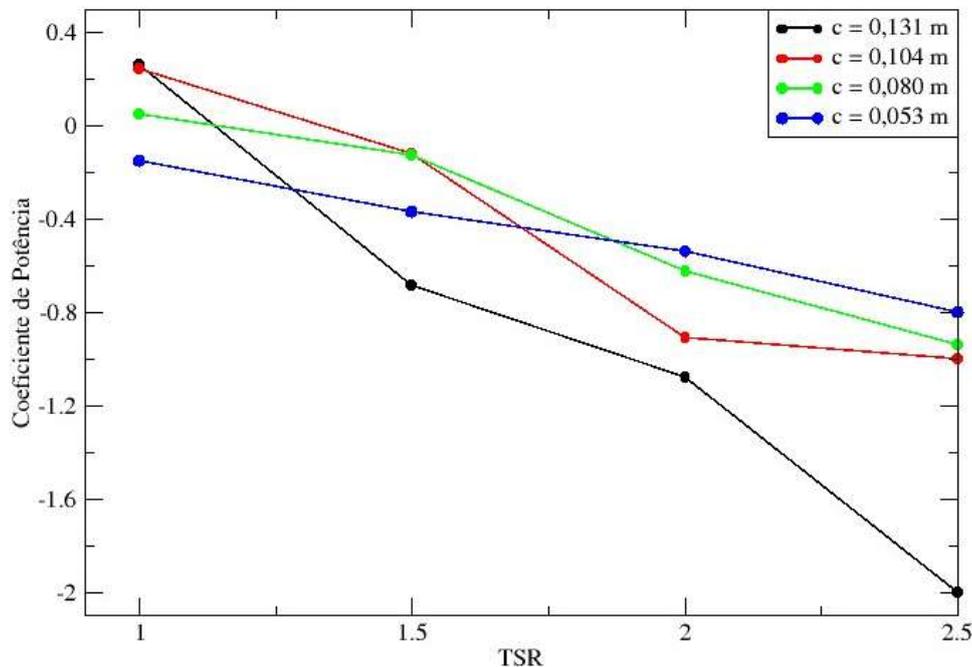
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 COEFICIENTE DE POTÊNCIA

Após convergência da solução numérica, são calculados os coeficientes de potência médio para cada comprimento de corda do perfil de pá (c) estudado em função da variação da razão da velocidade de ponta de pá (TSR). O coeficiente de potência possibilita a avaliação da eficiência aerodinâmica da

turbina eólica em relação ao aproveitamento da energia cinética do vento sendo os resultados obtidos ilustrados de forma gráfica pela Figura 4.

Figura 4: Coeficiente de potência médio em função do TSR.



Fonte: Autor (2023).

É observado no gráfico da Figura 4 que os coeficientes de potência máximos para os comprimentos de corda de perfil de pá são atingidos com razão de velocidade de ponta de pá igual a 1, e para valores maiores dessa razão, é notado que os coeficientes de potência diminuem até atingirem seu valor mínimo em 2,5. Ademais, constata-se que para TSR igual a 1 os coeficientes de potência aumentam de maneira proporcional aos comprimentos de corda de perfil de pá, sendo assim, o maior valor, equivalente à 0,26079, é atingido para o comprimento igual a 0,131 m.

Em seguimento, para TSR igual a 1,5, é percebido parcialmente a alteração dessa proporcionalidade, pois c igual a 0,131 m detém o menor coeficiente de potência de -0,68498. A partir do TSR igual a 2, sucede-se uma inversão de proporcionalidade, uma vez que, nesse instante os maiores valores dos coeficientes de potência são alcançados à proporção que os comprimentos de corda de perfil de pá diminuem, nessa condição, para c igual a 0,053 m e C_p igual a -0,53739.

Esse efeito é ocasionado devido a solidez da turbina eólica Darrieus-H, visto que, maiores comprimentos de perfil de corda possuem maior solidez e conforme também constatado por Du et al. (2019) e Ghaseminian et al. (2017) terão uma melhor eficiência aerodinâmica para menores valores de razão velocidade de ponta de pá. No entanto, com o aumento do TSR ocorre a diminuição do desempenho de maneira rápida como observado por Du et al. (2019) e Ghaseminian et al. (2017).

Além do mais, para menores comprimentos de corda de perfil de pá, sendo assim, menor solidez, nota-se pelo gráfico da Figura 4 que há uma menor variação dos valores entre os coeficientes de potência na faixa da razão da velocidade de ponta de pá e detém melhor eficiência para maiores valores dessa razão comparados com os perfis de maior comprimento de corda que também foi observado por Du et al (2019).

Apesar disso, para as menores solidezs nessa análise de 1 e 1,5 que correspondem respectivamente aos comprimentos de corda de perfil de pá igual a 0,053m e 0,080 m, ainda assim, essas não atingem performance suficiente para ser viabilizado a um projeto eólico de microgeração, pois a turbina eólica é projetada para operar em máxima eficiência aerodinâmica. Em síntese, os melhores resultados para cada comprimento de corda de perfil de pá podem ser visualizados conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Coeficiente de potência máximo em relação a solidez.

Comprimento de corda (m)	Coeficiente de Potência	Solidez
0,053	-0,15168	1,0
0,080	0,04994	1,5
0,104	0,24302	2,0
0,131	0,26079	2,5

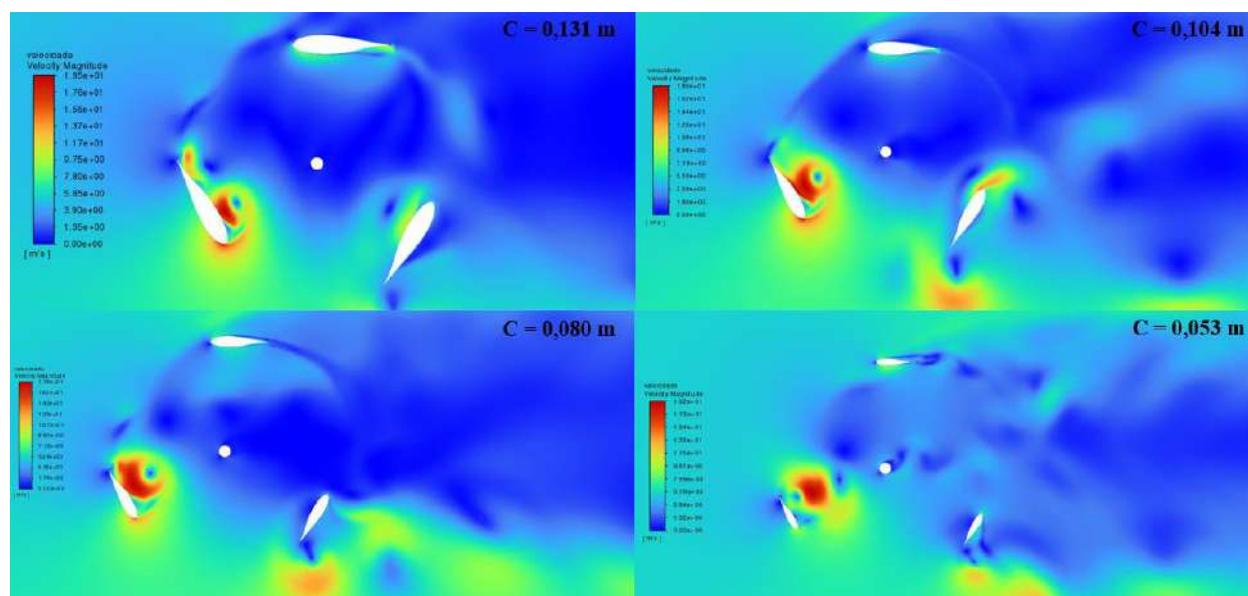
Fonte: Autor (2023).

4.2 CONTORNOS DE VELOCIDADE E PRESSÃO

Os contornos de velocidade e pressão descrevem o comportamento do escoamento do fluido sobre as pás eólicas em um regime transiente. Para tal análise, serão abordadas as configurações geométricas do rotor eólico com as melhores eficiências aerodinâmicas apresentadas na Tabela 5 da seção anterior, nesse caso, para o TSR igual a 1.

A escala de cores adotada para visualização dos contornos que serão avaliados consiste em cores mais intensas com tonalidade avermelhada para os valores máximos e menos intensas com tonalidade azulada para os valores mínimos. Assim como, as pás estarão dispostas em posições azimutais de 0°, 120° e 240° tendo como referência geométrica a pá superior do rotor eólico no sentido anti-horário. Os contornos de velocidade do escoamento de fluido que representam os comprimentos de corda descritos são observados pela Figura 5.

Figura 5: Contorno de velocidade para os comprimentos de corda de perfil de pá.



Fonte: Autor (2023).

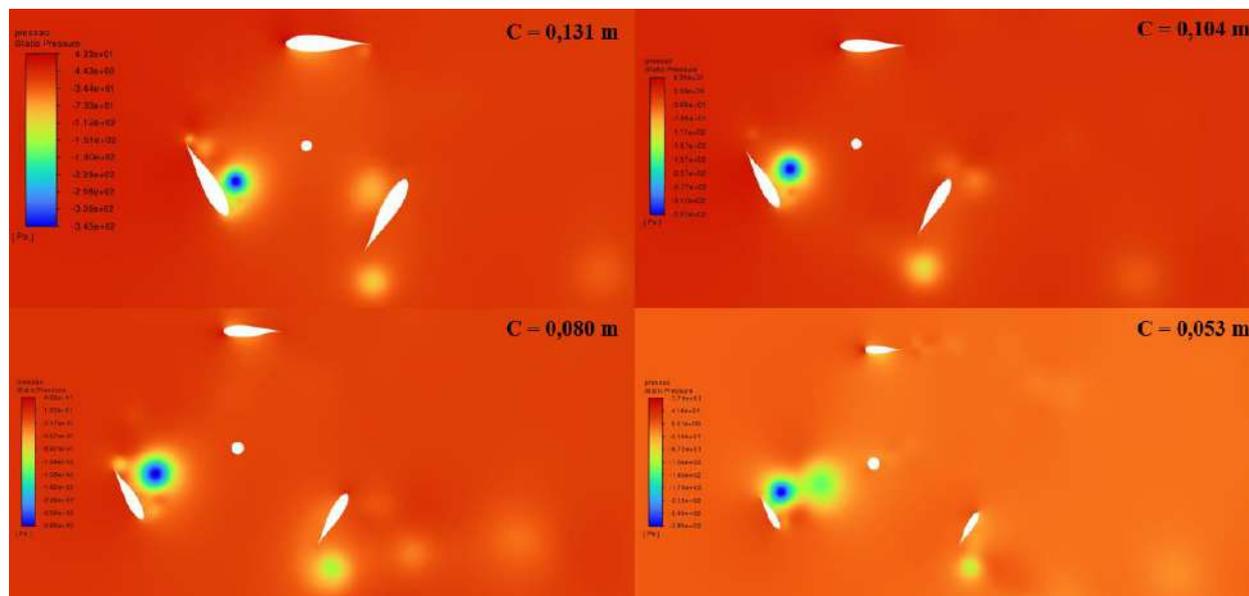
É observado nos contornos de velocidade representados o comportamento característico de um rotor eólico, que compõe de regiões de escoamento de fluido com velocidade nula ou mínima no eixo principal do rotor e na região de esteira, sendo assim, na parte traseira do rotor que se estende ao longo do domínio computacional.

Analisando a região ao redor das pás eólicas, nota-se que na posição azimutal de 0° o escoamento de fluido incide com menor intensidade comparado a 120°, este por sua vez, detém maiores velocidades devido ao ângulo de ataque ser mais elevado em decorrência da força aerodinâmica de sustentação. Além disso, percebe-se pelas escalas dos contornos das Figuras 19, 20, 21 e 22 que a maior velocidade entre

os comprimentos de perfil de corda estudados é atingida pelo comprimento igual a 0,131 m alcançando velocidade máxima de 19,5 m/s.

Adicionalmente ao entendimento da ação da força aerodinâmica de sustentação, está surge em consequência ao diferencial de pressão sobre as pás eólicas. Os contornos de pressão do escoamento de fluido que representam os comprimentos de corda descritos são observados pela Figura 6.

Figura 6: Contorno de pressão para os comprimentos de corda de perfil de pá.



Fonte: Autor (2023).

Os contornos de pressão apresentados evidenciam regiões de alta pressão no extradorso das pás eólicas, assim como, regiões com menores pressão na região do intradorso. Esse diferencial de pressão impulsiona a pá eólica para cima e consequentemente uma maior força de sustentação que ocasiona o movimento do rotor eólico como também observado por Balduzzi et al. (2016). Dessa forma, demonstra coerência aos efeitos esperados.

Ademais, é visualizado que à proporção que os comprimentos de corda diminuem uma zona circular de baixa pressão localizada no intradorso da pá estende-se ao bordo de fuga e aumenta de tamanho resultando em uma maior força de arrasto que tem sentido contrário ao movimento, logo, uma maior resistência a este e menores velocidades serão alcançadas. Essa análise demonstra o porquê que os menores comprimentos de corda de perfil de pá para o TSR igual a 1 detiveram a menor eficiência energética como abordado pela Tabela 5.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O setor de energia eólica vem crescendo nos últimos anos no país, no qual o estado da Bahia destaca-se em geração de energia eólica. Nesse sentido, tem-se perspectivas favoráveis para maiores investimentos financeiros e intelectuais no desenvolvimento de tecnologia. A vista disso, há relevância a esse trabalho que se propôs a analisar as características geométricas e modelar computacionalmente uma turbina eólica de eixo vertical Darrieus-H com perfil de aerofólio DU-06-W-200, além de obter os coeficientes de potência com objetivo de investigar o parâmetro da solidez. Por esse motivo, conclui-se que esse trabalho foi satisfatório pois os objetivos foram atingidos.

Nesse trabalho foi constatado que a melhor eficiência aerodinâmica de 26,08% foi alcançada para o comprimento de corda de perfil de pá de 0,131 m com solidez de 2,5 e TSR de 1. Todavia, o comprimento de corda de 0,104 com solidez de 2 e TSR de 1, apresentou eficiência de 24,30% o que torna ambas a cordas de perfil de pá nas condições descritas com características interessantes para estudos mais aprofundados que viabilizem futuros projetos eólicos de microgeração. Entretanto, sugere-se a análise com menores comprimentos de corda e maiores velocidades de ponta de pá para verificar se nessa configuração a um melhor desempenho do rotor eólico.

Outro fator de influência nos resultados, será a utilização de uma máquina com melhor processador para ser possível a execução de maior quantidade de revoluções para o modelo de convergência a cada configuração geométrica que nessa análise consistiu em cinco revoluções. Ademais, a utilização do *software* ANSYS FLUENT em uma versão não estudantil, pois está não haverá limitação de elementos de malha e poderá gerar resultados mais próximos a realidade. Com isso, essa análise pode ser utilizada como base para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

AHMADI-BALOUTAKI, M. CARRIVEAU, R; TING, D.S-K. Straight-bladed vertical axis wind turbine rotor design guide based on aerodynamic performance and loading analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 228, 742 – 759, 2014.

AHMED, S.; AWAIS, M. M. **CFD analysis of 2D H-Type Darrieus Turbine (VAWT)**. 2022. Disponível em: <<https://www.udemy.com/course/cfd-analysis-of-2d-darrius-turbine-vawt-using-ansys-fluent/>>. Acesso em: 07 de julho de 2023.

BALDUZZI, F. et al. Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. *Renewable Energy*, v. 85, p. 419-435, 2016.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos**. Grupo A, 2015. E-book. ISBN 9788580554915. 2022.

DU, L; GRANT, I; DOMINY, R.G. A review of H-Darrieus wind turbine aerodynamic research. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, v. 233, p. 23–24, 2019.

DURGA, C.P; MISHRA, D.P. CFD simulations for the selection of an appropriate blade profile for improving energy efficiency in axial flow mine ventilation fans. *Journal of Sustainable Mining*, 13 (1), p. 15-21, 2014.

GHASEMIAN, M; ASHRAFI, N; SEDAGHAT, A; A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines. *Energy Conversion and Management*. v.149, p. 87-100, 2017.

HANSEN, J. T.; MAHAK, M.; TZANAKIS, I. Numerical modelling and optimization of vertical axis wind turbine pairs: A scale up approach. *Renewable Energy*, v.171, p. 1371-1381, 2021.

JAIN, S.; SAHA, U. K. The State-of-the-Art Technology of H-Type Darrieus Wind Turbine Rotors. ASME. *Journal of Energy Resources Technology*. v.142, 2020.

KC, A; WHALE, J; URMEE, T. Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: **A review**. *Renewable Energy*, v.131, p. 268-283, 2019.

KUMAR, R.; RAAHEMIFAS, K.; FUNG, A.S. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.89, p. 281-291, 2018.

MEANA-FERNÁNDEZ, A. et al. Parametrical evaluation of the aerodynamic performance of vertical axis wind turbines for the proposal of optimized designs. *Energy*. v.147, p 504-517, 2018.

MOUKALLED, F.; MANGANI, L; DARWISH, M. *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. An Advanced Introduction with OpenFOAM. ® and Matlab.* Switzerland: **Springer International Publishing**. v.113, 2016.

SAGHARICHI, A; ZAMANI, M. GHASEMI, A. Effect of solidity on the performance of variable-pitch vertical axis wind turbine. **Energy**. v.161, p. 753-775, 2018.

TJIU, W; MARNOTO, T; MAT, S; RUSLAN, M.H; SOPIAN, K. Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations. **Renewable Energy**. v.75, p. 50-67, 2015.

TU, J; YEOH, G.H; LIU, C. *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. 2 ed. Butterworth-Heinemann, 2013.

ZHANG, L. et al. Influences of trailing edge split flap on the aerodynamic performance of vertical axis wind turbine. **Energy Science & Engineering**, v.9, p. 101-115, 2021.

ZHU, H et al. Numerical study of effect of solidity on vertical axis wind turbine with Gurney flap. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 186 186, p. 17-31, 2019.

LEAN CONSTRUCTION E CONSTRUÇÃO 4.0 EM OBRAS DE PARQUES EÓLICOS: PROJETO COMEÇAR CERTO

Caio Mendes Lima¹, Lucas Henrique Nascimento², Marcus Costa Tenório Fireman³, Bernardo Martim Beck da Silva Etges⁴

1, 2, Grupo Cortez, Fortaleza, Brasil

3, 4, Climb Consulting Group, Porto Alegre, Brasil

caiolima@cortezengenharia.com.br, lucashenrique@cortezengenharia.com.br,
marcus@climbgroup.com.br, bernardo@climbgroup.com.br

RESUMO

O presente artigo apresenta, a partir de um estudo de caso, a aplicação de integração entre o Lean Construction (LC) e a Construção 4.0 em uma empresa que atua em projetos de parques eólicos. A construção desses parques envolve desafios, como falta de engajamento, falhas na integração e coordenação entre as partes envolvidas. Estudos mostram que a aplicação do Lean na construção tem ajudado nessas áreas. O objetivo deste trabalho foi apresentar a jornada de implementação Lean e os resultados da aplicação da integração entre o Lean e a Construção 4.0 em uma empresa que atua em projetos de parques eólicos, além de propor aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 associadas ao Lean Construction. O método utilizado neste artigo foi a pesquisa-ação, o qual passou pelas etapas de mapeamento do processo de implementação por meio de um estudo de caso, análise das ferramentas e técnicas, assim como propostas de aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 no LC. Os resultados apresentaram que a implementação contribuiu com a aplicação de oito princípios dessa filosofia, repercutindo em melhorias principalmente nas áreas de processos, planejamento e gestão da informação. A utilização das tecnologias e ferramentas provenientes da indústria 4.0 também revelaram benefícios associados ao LC, as tecnologias foram, Cloud Computing Mobile Computing, BIM e Realidade aumentada. Dito isso, constatou-se que as tecnologias da Indústria 4.0 possibilitam a coleta de informação de forma eficaz contribuindo assim com as demandas relacionadas aos princípios do LC.

Palavras-chaves:

Parques Eólicos; Lean Construction; Indústria 4.0; Construção 4.0

ABSTRACT

This article presents, through a case study, the integrated application of Lean Construction (LC) and Construction 4.0 in a company involved in wind farm projects. The construction of these parks involves challenges such as lack of engagement, integration failures, and coordination issues among the parties involved. Studies have shown that the application of Lean in construction has helped address these areas. The objective of this work was to present the implementation journey of Lean and the results of applying the integration between Lean and Construction 4.0 in a company working on wind farm projects, as well as proposing the application of Industry 4.0 technologies associated with Lean Construction. The method used in this article was action research, which involved mapping the implementation process through a case

study, analyzing tools and techniques, and proposing the application of Industry 4.0 technologies in LC. The results showed that the implementation contributed to the application of eight principles of this philosophy, resulting in improvements primarily in the areas of processes, planning, and information management. The use of Industry 4.0 technologies and tools also revealed benefits associated with LC, including Cloud Computing, Mobile Computing, BIM, and Augmented Reality. It was found that Industry 4.0 technologies enable effective data collection, thus contributing to the demands related to the principles of LC.

Keywords:

Wind farms; Lean Construction; Industry 4.0; Construction 4.0.

1. INTRODUÇÃO

A construção de parques eólicos é um empreendimento extenso que requer a colaboração de diversas partes envolvidas em sua concepção. No contexto da construção civil, as atividades de terraplenagem, fundação e drenagem desempenham um papel crucial. Essas etapas demandam uma considerável quantidade de mão de obra, devido às suas características horizontais e à necessidade de um gerenciamento eficaz, devido à interdependência das atividades. De acordo com a pesquisa realizada por Diógenes et al. (2020), dentre os desafios na implementação de parques eólicos destacam-se a falta de engajamento, falhas na integração e coordenação efetiva das partes interessadas.

Diante desses desafios, observa-se que a construção de parques eólicos possui considerável complexidade em sua concepção. Um número crescente de artigos foi publicado nos últimos anos, demonstrando os benefícios da aplicação do Lean na construção (WICKRAMASEKARA, et al. 2021), fatores como a melhora na coordenação e engajamento das equipes, aumento da transparência dos processos, redução de desperdícios e aumento de produtividade foram alguns dos benefícios citados. O Lean Construction (LC) é uma abordagem de gestão da produção aplicada ao setor da construção. Suas características fundamentais englobam um conjunto definido de objetivos para o processo de entrega, com foco em maximizar o desempenho e satisfação do cliente em cada etapa do projeto (KOSKELA; HOWELL; BALLAR, 2002). Esta forma de gestão é guiada por conceitos fundamentais, tais como a redução de desperdício, aumento da colaboração e o pensamento em fluxo e ritmo.

No contexto associado ao LC, a ferramenta LPS assume um papel fundamental devido à sua visão ampla do processo. Trata-se de um sistema de planejamento e controle de produção que tem como objetivo mitigar as variações no fluxo de trabalho na indústria da construção, fornecendo previsões e reduzindo a incerteza nas operações (RAJPRASAD, 2014). O LPS se destaca por sua capacidade de integrar de forma clara o planejamento em três níveis: estratégico (longo prazo), tático (médio prazo) e operacional (curto prazo) (VIEIRA; BERGE; BARROS NETO, 2020).

Apesar dos benefícios que o Lean proporciona, poucos estudos se dedicaram para estudar sua aplicação em projetos de energia eólica, onde a complexidade dos processos e as longas distâncias são elementos que maximizam os desafios, uma vez que dificultam a troca de informações e comunicação entre os

envolvidos.

O LC vai além das ferramentas de gerenciamento, trazendo princípios que conduzem para uma otimização das operações em construções através de tecnologias inteligentes e digitais (HAMZEH, et al. 2021). Essa abordagem destaca a necessidade de novas propostas tecnológicas que melhorem a coleta e o registro de dados, uma vez que a demanda por informações e análises provenientes do LC é crescente. Dito isso, faz-se necessária uma mudança em direção ao Lean Construction 4.0, prestando atenção às sinergias entre a teoria da gestão da produção e as tecnologias digitais/inteligentes (HAMZEH, et al. 2021).

O presente trabalho busca apresentar a jornada e os resultados da aplicação integrada entre o Lean e a Construção 4.0 em uma empresa que atua em projetos de energia eólica.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Lean Construction – Princípios e ferramentas associadas

Koskela (1992) apresentou, a partir de um trabalho seminal, onze princípios associados ao LC, sendo estes: redução das atividades que não agregam valor; aumento do valor agregado a partir das considerações do cliente; redução da variabilidade; redução do tempo de ciclo; simplificação dos processos; aumento de flexibilidade; aumento da transparência dos processos; foco no processo como um todo; implantação de melhoria contínua nos processos; equilíbrio entre as melhorias de fluxo e conversão e benchmark. O autor também enfatiza que estes princípios definem os desafios enfrentados no processo de fluxo, tais como complexidade, falta de transparência ou controle fragmentado.

No contexto associado ao LC, a ferramenta LPS assume um papel fundamental pois permite a aplicação prática de alguns princípios, como é o caso da redução da variabilidade, alcançada a partir da identificação e remoção de restrições que podem impactar o desempenho das tarefas durante a semana, outro princípio aplicado a partir do LPS é o foco no processo como um todo, uma vez que a aplicação da técnica da linha de balanço ou do tempo caminho no horizonte de longo prazo permitem manter a visão do projeto global.

Outra ferramenta facilitadora do LC é a Grande Sala (The Big Room). Neste ambiente, todas as informações referentes ao empreendimento são exibidas com o auxílio de painéis, codificação de cores, LPS e demais informações consideradas importantes (SINGH; KUMAR, 2020). Este mesmo autor ainda ressalta que esta sala contribui com a transparência das informações, deixando os riscos mais evidentes.

Dentre as ferramentas que apoiam o princípio da melhoria contínua, se encontram a ida ao Gemba, que se refere à prática de “ir e ver” fisicamente o que está acontecendo em campo, buscando entender melhor os problemas e os processos reais de trabalho com os quais os funcionários lidam todos os dias para criar valor para o cliente (IMAI, 2012; DAVID, 2020) e também associado as práticas de melhoria contínua do Lean, a ferramenta A3 é um relatório que apresenta uma descrição das condições atuais de uma situação, analisa a causa raiz, estabelece ações propostas a serem tomadas e documenta o cenário posterior após a conclusão das ações (TA; XU, 2017). Os mesmos autores relatam que este documento possui esta nomenclatura devido a sua elaboração ser realizada em um papel tamanho A3.

2.2 Construção 4.0

Do ponto de vista tecnológico, a Indústria 4.0 refere-se ao processo de expansão da digitalização e automação na indústria de manufatura, além da criação de uma cadeia de valor digital que permite a interconexão entre produtos, seu ambiente e parceiros comerciais (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016). Da mesma forma, a indústria da construção tem se beneficiado dos avanços tecnológicos, resultando no surgimento do conceito de Construção 4.0, que tem ganhado popularidade nos últimos anos (FORCAEL, et al. 2020). Além disso, o Building Information Modeling (BIM) é conhecido como a tecnologia central para a digitalização do ambiente de construção. De acordo com Yin et al. (2019), o BIM permite que os usuários avaliem cenários do processo de construção em um ambiente virtual por meio de um modelo tridimensional enriquecido com informações.

Considerando as tecnologias e conceitos fundamentais da Indústria 4.0, temos a Internet das Coisas (IoT) e a Internet de Serviços (IoS), a Computação em Nuvem, o Big Data, a Fábrica Inteligente, a Impressão 3D e os Sistemas Ciber-Físicos (CPS) ou Sistemas Incorporados, a Realidade Aumentada (AR), a Realidade Virtual (VR) e a Realidade Mista (MR), juntamente com a Interação Humano-Computador (HCI), desempenham um papel crucial na Indústria 4.0, permitindo a criação de um ambiente de construção digitalizado (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; FORCAEL, et al. 2020).

Estudo recente realizado por Valamede e Akkari (2020) mostrou que a computação em nuvem foi aplicada a demandas associadas ao Lean, possibilitando uma comunicação unificada entre o nível de tecnologia e o nível hierárquico de uma organização. Oesterreich e Teuteberg (2016) destacam que essas tecnologias mencionadas foram agrupadas em três categorias: fábrica inteligente, modelagem e simulação, e digitalização e virtualização. No presente estudo, destacou-se especialmente o grupo de digitalização e virtualização, enfatizando as tecnologias de computação em nuvem e computação móvel.

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi utilizado o método de pesquisa Pesquisa-ação. Este método foi escolhido devido a sua capacidade de investigação-ação que envolvem a melhoria da prática por meio de uma oscilação sistemática entre agir e investigar (DAVID, 2005). O estudo foi conduzido em três etapas, conforme apresentado na Figura 1.

A etapa inicial é definida como o mapeamento do processo de implementação Lean, o qual foi composto por ciclos caracterizados neste estudo como “ondas”. A segunda etapa representa o estudo sobre a análise das ferramentas e técnicas utilizadas durante a implementação. Vale ressaltar que a primeira e segunda etapa foram descritas em um mesmo tópico para melhor entendimento. A terceira etapa apresenta uma proposta de aplicação das tecnologias da indústria 4.0 associadas ao Lean Construction.

Figura 1. Estrutura metodológica.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

- Características da empresa estudada

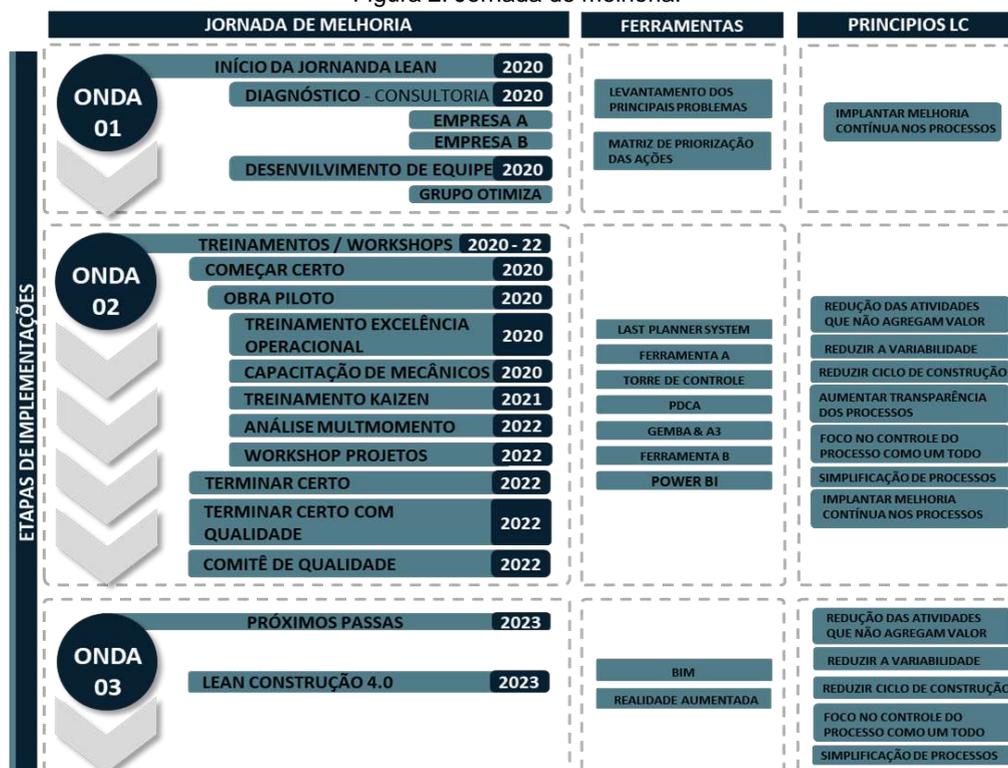
Neste estudo o mapeamento e análises foram realizados com a Empresa X, a qual possui know-how técnico especializado na execução de construções de energia alternativa, tendo desenvolvido mais de 310 usinas de energia eólica (3.539 fundações para aerogeradores) e 11 usinas de energia solar. Contribuindo com mais de 10 GW à matriz energética brasileira.

4.0 RESULTADOS

4.1 Mapeamento e análise

O processo de implementação Lean foi conduzido pelas empresas de consultoria “Empresa A” e “Empresa B” a partir de 2020 e continua em andamento até o presente momento. Esta jornada de implementação pode ser identificada na Figura 2, assim como as ferramentas utilizadas e os princípios do LC associados. As etapas foram detalhadas nos tópicos a seguir:

Figura 2. Jornada de melhoria.



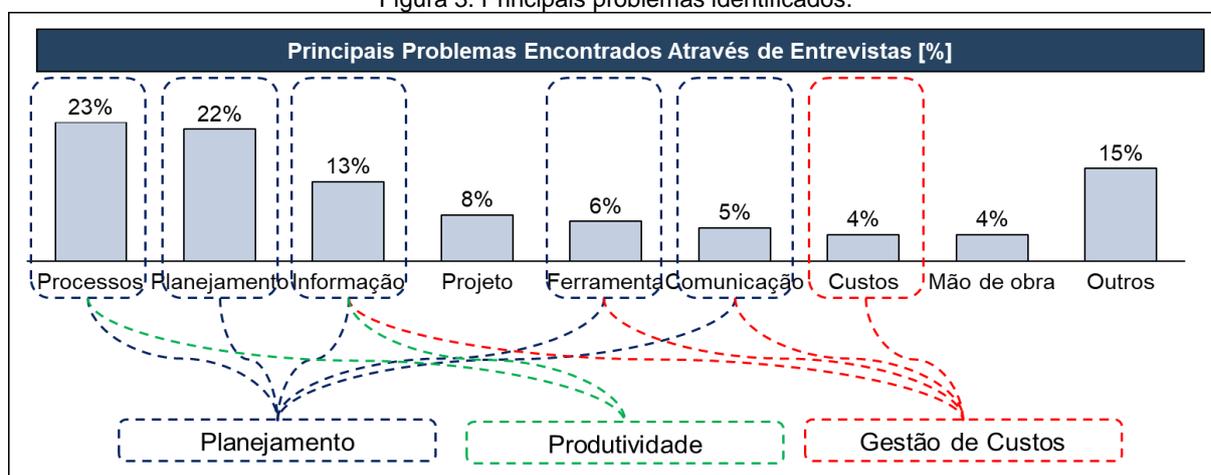
Fonte: Elaboração própria, 2023.

- Onda 01

A primeira onda foi iniciada com a equipe de consultoria realizando o diagnóstico, buscando conhecer e envolver o time da obra em novas práticas para a gestão eficiente da obra; levantar e analisar evidências: dados e fatos; observações de campo e entrevistas; identificar os principais pontos pivôs e suas alavancas de melhoria; estimar quantitativamente os potenciais de melhoria; descrever ações e prioridades através de Plano de Implementação. Essa etapa teve a duração de três semanas e contou com a participação de 17 funcionários, incluindo membros da matriz e da obra, dentre estes participantes estavam gestores de contratos, engenheiros de campo e de escritório.

Durante esse período de diagnósticos, uma serie de investigações foi realizada, a fim de obter a visão dos colaboradores sobre as áreas da empresa que mais apresentavam problemas. Na Figura 3, é possível resumir esses pontos focais em três grupos: planejamento, produtividade e gestão de custos.

Figura 3. Principais problemas identificados.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Com base na análise da Figura 3, foi possível identificar que as áreas com maior problema relatada pelos colaboradores foram os processos, o planejamento e a gestão de informações. Embora as áreas de ferramentas, comunicação e custos apresentassem uma porcentagem mais baixa, foram consideradas relevantes devido à sua correlação com os pontos focais identificados anteriormente. Esses indicadores desempenharam um papel fundamental ao direcionar as ações de melhoria. Como resultado, foram elaborados planos de ação específicos (Figura 4) para abordar essas áreas de maior impacto negativo e identificar pontos para atuar nas mudanças.

Tendo isso em vista, ações relacionadas ao planejamento e às estratégias de produção foram identificadas como tendo um impacto significativo e podem ser implementadas em um curto período de tempo (Figura 4). Por outro lado, observou-se que a produtividade das frentes de drenagem e a eficiência operacional apresentaram um impacto menor, mas ainda assim podem ser implementadas em prazo reduzido.

Figura 4. Matriz de Priorização das ações.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Para apoiar no plano de ação, a empresa estruturou um projeto de transformação cultural chamado Grupo Otimiza, responsável por conduzir as atividades relacionadas à mudança e melhoria. Neste projeto foi estruturado um grupo multidisciplinar formado por profissionais capacitados e engajados, cujo objetivo principal foi impulsionar a transformação organizacional por meio da implementação das ações definidas nos planos de ação.

- Onda 02

A segunda onda foi marcada pelo Projeto Começar Certo e demais eventos (Figura 2), os quais proporcionaram os resultados alinhados aos objetivos esperados. Ao longo destas etapas, foram introduzidas ferramentas nos processos com foco nas áreas que apresentaram os maiores problemas. Neste sentido, o Quadro 01 mostra a relação destas ferramentas, as áreas, assim como os princípios do LC associados aos resultados encontrados durante esse processo de implementação.

Quadro 1. Ferramentas utilizadas na Onda 02.

Ferramenta	Área	Princípios LC
LAST PLANNER SYSTEM (LPS)	Ferramentas; Planejamento; Custo.	Redução das atividades que não agregam valor; Reduzir a variabilidade; Reduzir ciclo de construção; Aumentar transparência dos processos; Foco no controle do processo como um todo.
FERRAMENTA A	Ferramentas; Processos; Informações.	Aumentar transparência dos processos.
TORRE DE CONTROLE	Processos; Comunicação; Custo.	Aumento do valor agregado a partir das considerações do cliente; Aumentar transparência dos processos; Implantar melhoria contínua nos processos
GEMBA & A3	Processos; Comunicação.	Redução das atividades que não agregam valor; Aumentar transparência dos processos.
FERRAMENTA B	Ferramentas; Processos; Informações.	Aumentar transparência dos processos; Redução das atividades que não agregam valor; Foco no controle do processo como um todo.
POWER BI	Comunicação; informações.	Aumentar transparência dos processos; Simplificação de processos.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Em relação às associações apresentadas no Quadro 01, pode-se observar que oito dos onze princípios do Lean Construction estudados por Koskela estão relacionados ao processo de implementação. Além disso, dentre as ferramentas listadas, é possível notar que a Ferramenta A, Ferramenta B e Power BI trazem um contexto tecnológico, fazendo uso de recursos da computação em nuvem.

As ferramentas com perfis tecnológicos desempenham um papel significativo no aprimoramento da gestão de informações. Entre as opções apresentadas no Quadro 01, a Ferramenta A é um sistema de gerenciamento de informações que permite o registro de dados no campo por meio de dispositivos móveis. Essas informações são posteriormente enviadas para um repositório de dados online, em que análises de checklists, produções e interferências são realizadas. Outra ferramenta relevante é a Ferramenta B, uma plataforma digital baseada no modelo de Sistema de Gestão Integrada (SGI), com foco na gestão de processos relacionados à Segurança do Trabalho, Meio Ambiente e Qualidade. Além disso, o Power BI é um aplicativo que permite a conexão, transformação e visualização de dados online.

A implementação destas ferramentas promoveu o aumento da transparência dos processos, possibilitando uma visão mais clara e abrangente das informações, além de permitir a redução de atividades que não agregam valor por meio de análises eficientes dos dados coletados. Essas ferramentas também enfatizaram o controle abrangente de todo o processo e contribuíram para a simplificação das operações, uma vez que a coleta manual de dados representava um obstáculo para a análise e desenvolvimento dos mesmos.

Em relação às ferramentas caracterizadas como técnicas, LPS assume um papel fundamental devido a sua visão ampla do processo. Além de que os níveis de médio e curto prazo proporcionam reuniões semanais e quinzenais para o acompanhamento. Outra ferramenta importante implementada foi a Torre de Controle, também conhecida na literatura como "The Big Room". As ferramentas Gemba e A3 foram utilizadas em conjunto, em que primeiro é feito um Gemba para realizar observações em campo e, em seguida, é elaborado um A3 para propor ações de melhoria. De maneira geral, o processo de PDCA (Plan-Do-Check-Act) foi incorporado nessas rotinas, buscando garantir que o ciclo de verificação ocorra regularmente.

Por meio da implementação das ferramentas técnicas, destacou-se a redução da variabilidade, a diminuição do ciclo da construção, o aumento da transparência nos processos, o foco no controle abrangente do processo, a implementação da melhoria contínua nos processos, a redução das atividades que não agregam valor e o aumento do valor agregado a partir das considerações do cliente. Esses resultados refletem o impacto positivo das práticas Lean, que visam eliminar desperdícios, otimizar a eficiência e promover um ambiente de trabalho mais eficaz e produtivo.

Tendo em vista os treinamentos, workshops e ferramentas implementadas durante a Onda 2, foram conduzidas rodadas de verificação para avaliar a conformidade, com foco principalmente no planejamento. A Figura 5 ilustra oito critérios que auxiliaram nessa avaliação, revelando uma melhoria inicial de 54%, seguida de um avanço adicional de 9% e posteriormente, de mais 3%, atingindo 97% dos critérios analisados (Figura 5 (b)).

Figura 5. Evolução dos itens relacionados ao planejamento.



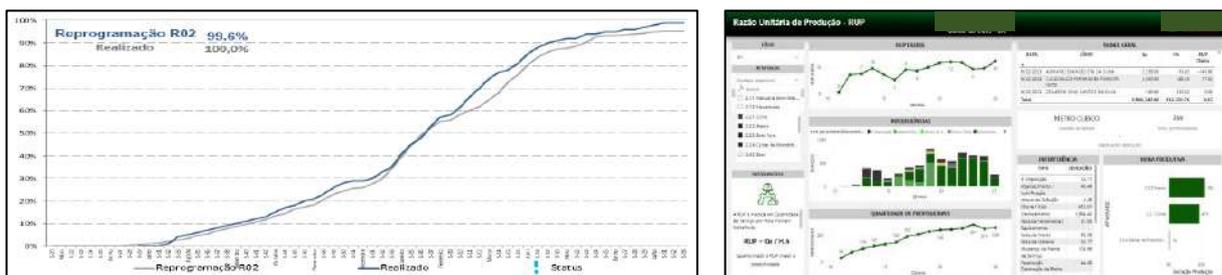
a) Evolução de melhoria de processos

b) Evolução de atendimento planejamento

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Analisando os resultados do desempenho dos projetos após a implementação das ferramentas, pode-se observar na Figura 6 a curva S de acompanhamento, que demonstra a execução das atividades planejadas de forma próxima ao previsto, com um desvio baixo ao longo do projeto. A Figura 6(b) apresenta um dos painéis do BI, onde é possível visualizar o controle da mão de obra com base nos dados da Ferramenta A e na compilação realizada no BI. Essas melhorias voltadas para o planejamento e estratégias de produção proporcionaram uma facilidade na visualização das informações, assim como eficiência e clareza nas análises.

Figura 6. Desempenho do projeto e visualização das ferramentas de controle.



a) Aderência do planejamento com o realizado

b) Painel de visualização Power BI

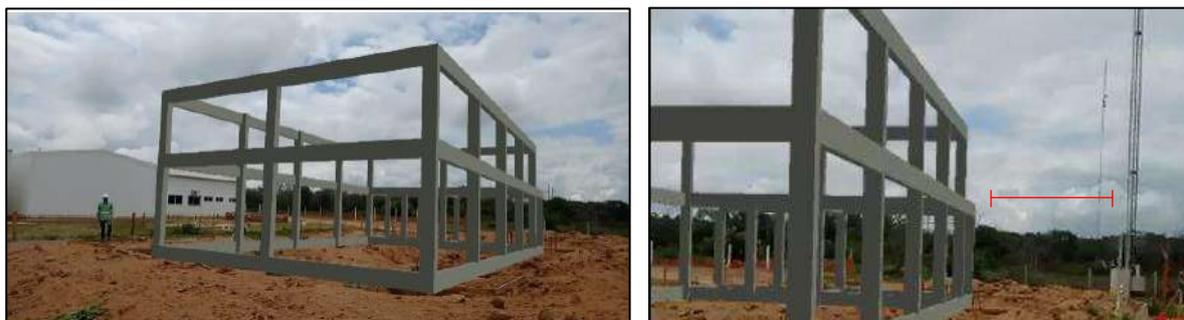
Fonte: Elaboração própria, 2023.

Levando em consideração a série de eventos realizados durante a implementação do LC e ferramentas mencionadas, observou-se ganhos de forma geral nos projetos realizados. Além disso, a contribuição das ferramentas tecnológicas mostrou que as demandas associadas ao Lean contribuíram para uma introdução aos conceitos da Construção 4.0, conduzindo para uma realidade do Lean Construction 4.0. Nesse sentido, a Onda 03 apresenta a continuidade do processo de melhoria contínua, buscando ferramentas alinhadas aos princípios LC.

- Onda 03

A terceira Onda teve um caráter exploratório, centrado nas necessidades da empresa (Figura 3). Seu objetivo foi identificar tecnologias da Indústria 4.0 que possibilitassem uma melhoria contínua alinhada aos princípios do LC. Nesta etapa foram utilizadas as tecnologias de Realidade Aumentada (RA) e Building Information Modelling (BIM), uma vez que estas tecnologias tem o potencial de ganhos relacionados ao planejamento e gestão de informação.

Figura 7. Representação da estrutura do prédio O&M em RA.



a) Visualização da estrutura do prédio O&M

b) Detalhes das estruturas ao redor

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Neste estudo foi utilizado a estrutura do prédio O&M como teste para prova de conceito das tecnologias RA e BIM (Figura 7 (a), (b)). Inicialmente foi elaborado um modelo BIM com base nos projetos 2D e em seguida este modelo foi inserido no aplicativo mobile da Augin, possibilitando a visualização em RA. Como resultado preliminar, o modelo BIM possibilitou um melhor entendimento do projeto para a equipe de planejamento e de campo. O modelo em RA auxiliou na identificação de possíveis interferências em campo, como a torre metálica posicionada próximo a construção (Figura 7 (b)). Esta visualização contribuiu com a ação de retirar a torre com antecedência, minimizando os impactos relacionados a logística do canteiro.

4.2 Proposta de aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 associadas ao Lean Construction.

Com base no mapeamento realizado na jornada de implementação Lean Construction na Empresa X e nas tecnologias relacionadas à Indústria 4.0 identificadas na literatura, é possível observar que a empresa estudada apresentou avanços em seu processo de melhoria, obtendo sucesso na aplicação dos princípios Lean associados a ferramentas técnicas e tecnológicas. Dentre essas tecnologias, destaca-se o grupo de digitalização e virtualização, enfatizando a computação em nuvem e computação móvel. No entanto, é importante ressaltar que cada princípio lean pode ser aplicado de forma mais detalhada, e as ferramentas técnicas, apesar dos benefícios claros que trouxeram, necessitam do apoio de um processo de digitalização para explorar todo o seu potencial, especialmente no que diz respeito à gestão de dados e informações.

O Quadro 2 destaca as tecnologias utilizadas durante a jornada de implementação. O grupo de Digitalização e Virtualização foi a primeira área a ser explorado, pois a coleta manual de dados representava um obstáculo para a análise e desenvolvimento dos mesmos. Em seguida, foram exploradas tecnologias voltadas para Simulação e Modelagem, revelando um potencial inicial de melhoria nos princípios Lean. Com base nisso, serão propostas outras aplicações dessas tecnologias nos tópicos a seguir.

Quadro 2. Tecnologias utilizadas na Onda 03.

Tecnologia	Grupos	Princípios LC
Cloud Computing	Digitalização e Virtualização	Aumentar transparência dos processos; Foco no controle do processo como um todo.
Mobile Computing	Digitalização e Virtualização	Simplificação de processos.
BIM	Simulação e Modelagem	Redução das atividades que não agregam valor; Reduzir a variabilidade; Reduzir ciclo de construção; Aumentar transparência dos processos; Foco no controle do processo como um todo.
RA	Simulação e Modelagem	Aumentar transparência dos processos; Simplificação de processos.

Fonte: Elaboração própria, 2023.

- **Proposta de aplicação de ferramentas de Digitalização e Virtualização**

O Cloud Computing associado ao Mobile Computing pode ser utilizado para atender às demandas de coleta de dados, especialmente nas informações relacionadas as documentações de segurança nas frentes de serviço. Essas documentações requerem registros detalhados e uma comunicação eficiente, uma vez que questões de segurança podem resultar em paralisações. Outra proposta adicional seria a utilização de painéis digitais na sala de controle, fornecendo informações de forma rápida e em tempo real. Isso permite acesso imediato a dados relevantes, auxiliando na tomada de decisões. Ao implementar essas soluções, é possível observar melhorias significativas voltadas para os princípios lean, como o aumento da transparência nos processos, o foco no controle do processo como um todo e a simplificação de processos.

- **Proposta de aplicação de ferramentas de Simulação e Modelagem.**

Por meio da utilização do BIM, é possível realizar análises e avaliações do projeto, identificando possíveis problemas, otimizando o uso de recursos e antecipando potenciais obstáculos. Isso permite um planejamento mais preciso, contribuindo para a tomada de decisões informadas e melhorias no desempenho do projeto (Yin, et al. 2019). Outra aplicação importante é o uso da Realidade Aumentada, semelhante ao estudo apresentado na Figura 7, porém com o benefício adicional de fornecer informações detalhadas sobre a montagem e aspectos específicos do projeto. Ao implementar essas soluções, é possível observar melhorias significativas voltadas para os princípios lean, como redução das atividades que não agregam valor, redução da variabilidade, redução de ciclo de construção, aumento da transparência dos processos e o foco no controle do processo como um todo.

6.0 CONCLUSÃO

O presente trabalho busca apresentar a jornada e os resultados da aplicação da integração entre o Lean e a Construção 4.0 em uma empresa que atua em projetos de energia eólica, além de propor aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 associadas ao Lean Construction. As ferramentas utilizadas foram o LPS, The Big Room, Gemba, A3, Power BI e dois sistemas de monitoramento e coletas de dados. Estas ferramentas possibilitaram a aplicação de oito princípios do Lean Construction, sendo estes, redução das atividades que não agregam valor, aumento do valor agregado a partir das considerações do cliente, redução da

variabilidade, redução do tempo de ciclo simplificação dos processos, aumento da transparência dos processos, foco no processo como um todo, implantação de melhoria contínua nos processos. Além disso, foram propostas aplicações das tecnologias Cloud Computing, Mobile Computing, BIM e RA.

Como sugestão para pesquisas futuras, é recomendável ampliar o estudo para abranger um maior número de empresas nesse setor.

REFERÊNCIAS

- David, T. **Pesquisa-ação: uma introdução metodológica**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 443-466, set./dez. 2005
- Diógenes, J. R. F.; Claro, J.; Rodrigues, J. C. Loureiro, M. V. Barriers to onshore wind energy implementation: A systematic review. **E. Research & Social Science**, v. 60, p. 1-33, 2020.
- Forcael, E.; Ferrari, I.; Opazo-Veja, A.; Pulido-Arcas, J. A.; Construction 4.0: A Literature Review. **Advanced Construction and Architecture**, v. 12, p. 1-28, 2020.
- Imai, M. Gemba Kaizen: A commonsense approach to a continuous improvement strategy. **Quality Management Journal**, p. 65-66, 2012.
- Isniah, S.; Hardi, H. P.; Debora F.; Plan do check action (PDCA) method: literature review and research issues. **J. Sistem dan Manajemen Industri**, v. 4, p. 72-81, 2020.
- Koskela, L. **Application of the new philosophy to construction**. CIFE Technical Report, n. 72: Center for Integrated Facility Engineering, Salford, 1992.
- Koskela, L.; Howell, G.; Ballard G.; Tommelein, I. The foundations of lean construction. **Em R. Best & G. Valence (Eds.), Design and construction: building in value**. p. 211-226, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2002.
- Mayr, A; Weigt, M.; Kuhl, A.; Grimm, S. Erll, M.; Potzel, J.; Frane. J, Lean 4.0 - A conceptual conjunction of lean management and Industry 4.0. **51st CIRP Conference on Manufacturing Systems**, Procedia CIRP 72, p. 622-628, 2018.
- Oesterreich, T. D.; Teuteberg, F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. **Computers in Industry**. v. 83, p. 121-139, 2016.
- Perrier, N.; Bled, A.; Bourgault, M.; Cousin, N.; Danjou, C.; Pellerin, R.; Roland, T. Construction 4.0: a survey of research trends. **J. of Information Technology in Construction**. v. 25, p. 416-437, 2020.
- Rajprasad J., Shuaibu S., Harish B. S. A Study and Application of Lean Construction Techniques Using Last Planner Concept in Residential Building. **International Journal of Engineering Development and Research**, IJEDR v. 2, p. 3264-3270, 2014.
- Romero, D.; Gaiardelli, P.; Wuest, T.; Powell, D.; Thüerer, M. New Forms of Gemba Walks and Their Digital Tools in the Digital Lean Manufacturing World. In: Lalic, B., Majstorovic, V., Marjanovic, U., von Cieminski, G., Romero, D. **Advances in Production Management Systems. Towards Smart and Digital Manufacturing. APMS 2020. IFIP Advances in Information and Communication Technology**, v. 592. p. 432–440 Springer, Cham. 2020.
- Singh, S.; Kumar, K. Study of lean construction and visual management tools through cluster analysis. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, Issue 1 p. 1153-1162, 2021.
- Ta, S.; Xu, X. X. Analysis of the A3 Report Template and Suggestions for Improvement, **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore**, p. 2302-2306, 2017.
- Valamede, L. S; Akkari, A. C. S. Lean 4.0: A New Holistic Approach for the Integration of Lean Manufacturing Tools and Digital Technologies. **International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences**, p. 851-868, 2020.

VIEIRA, B. M. P.; BORGES, R. M. S.; BARROS NETO, J. P. Planejamento e controle de atividades de um escritório de projetos BIM de arquitetura e engenharia sob a ótica do Sistema Last Planner. Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído, 18., 2020. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, p. 1–8, 2020.

Wickramasekara, A. N.; Gonzalez, V. A.; O'Sullivan M.; Walker C. G.; Abdelmegid, M. A. **Exploring controlled experimental settings for lean construction research**, Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC29), Proc. 29, p. 177-186, 2021.

Yin, X.; Liu, H.; Chen, Y.; Al-hussein M. Building information modelling for off-site construction: Review and future directions. **Autom. in Construction**. v.101, p. 72–91, 2019.

Análise do comportamento térmico e das propriedades físico-mecânicas de concretos utilizados em fundações de torres eólicas *onshore* com aplicação de nitrogênio líquido para pré-resfriamento

Wanner Kelly Damasceno da Silva¹, Leonária Araújo Silva², Antônio Eduardo Bezerra Cabral³, Marcelo Silva Medeiros Júnior⁴, Gustavo de Medeiros Pinheiro⁵, Antônio Medeiros de Oliveira⁶

1, 2, 3, 4 Universidade Federal do Ceará (UFC)

5, 6 Dois A Engenharia e Tecnologia

kellydamasceno@alu.ufc.br, leonaria@alu.ufc.br, eduardo.cabral@ufc.br,
marcelomedeiros@ufc.br, gustavo.pinheiro@doisa.com, antonio@doisa.com

RESUMO

As turbinas eólicas *onshore* são comumente suportadas por fundações maciças, compostas por centenas de metros cúbicos de concreto e toneladas de aço. O composto cimentício libera elevado calor de hidratação durante o processo de construção, especialmente no período inicial. O gradiente de temperatura elevado gera tensões de tração significativas, ocasionando o surgimento de fissuras. Há a necessidade de medidas de controle do aumento de temperatura, na qual vários métodos preventivos podem ser adotados para controlar esse gradiente. Assim, o presente estudo tem por objetivo analisar o comportamento térmico e as propriedades físico-mecânicas de concretos aplicados a fundações de torres eólicas *onshore*, a partir da avaliação do uso de nitrogênio líquido como método de pré-resfriamento. Foram produzidas quatro variações de um mesmo traço de concreto, sendo T1 as amostras de referência, portanto não foi utilizado método de resfriamento; para a variação T2, utilizou-se gelo em escamas em substituição total à água de amassamento do traço; foi aplicado nitrogênio líquido nas amostras T3 e T4, sendo resfriado o concreto fresco ao final do processo de mistura para T3 e resfriado os agregados e a água de amassamento ao longo do procedimento de execução do concreto T4. Amostras de concreto foram inseridas em calorímetro semi-adiabático para análise térmica ao longo de sete dias, bem como foram produzidos concretos de classe 30 MPa para avaliação das propriedades físicas e mecânicas. Os resultados evidenciam a eficiência do uso de nitrogênio líquido para redução de temperatura em condições de concretagem em regiões de clima quente.

Palavras-chaves: Comportamento térmico; Fundações de torres eólicas; Concretos; Nitrogênio líquido; Métodos de resfriamento.

ABSTRACT

Onshore wind turbines are commonly supported by massive foundations made up of hundreds of cubic meters of concrete and tons of steel. The cementitious compound releases high heat of hydration during the construction process, especially in the initial period. The high temperature gradient generates stress projections, causing the appearance of cracks. There is a need for temperature rise control measures, whereby various preventive methods can be adopted to control this gradient. Thus, this study aims to analyze the thermal behavior and physical-mechanical properties of concrete applied to the foundations of onshore wind towers, based on the evaluation of the use of a water tank as a pre-cooling method. Four variations of the same concrete mix were produced, with T1 as the Reference, therefore the cooling method was not used; for the T2 variation, ice flakes were used in total replacement of the mix mix water; Liquid was applied to samples T3 and T4, the fresh concrete being cooled at the end of the mixing process for T3 and the aggregates and mixing water cooled throughout the execution procedure for concrete T4. Concrete samples were embedded in a semi-adiabatic calorimeter for thermal analysis over seven days, as well as 30 MPa class concretes were produced for the evaluation of physical and mechanical properties. The results show the efficiency of using liquid to reduce the temperature in concreting conditions in hot climate regions.

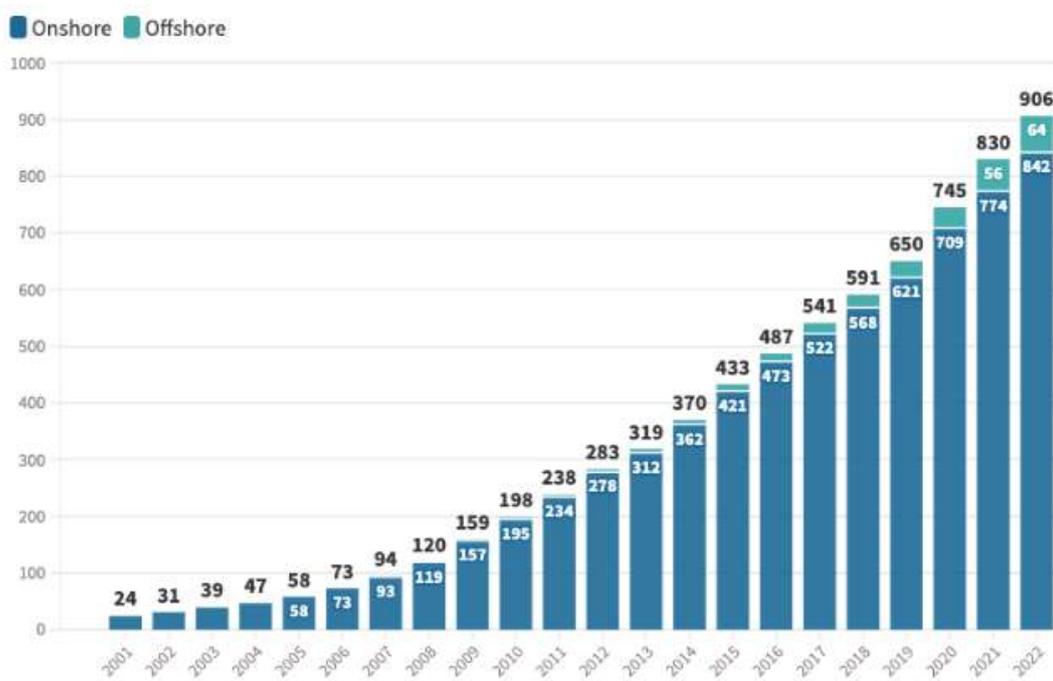
Keywords: Thermal behavior; Wind tower foundations; Concrete; Liquid nitrogen; Cooling methods.

1. INTRODUÇÃO

As energias renováveis são cada vez mais importantes na matriz energética de muitos países, frente ao elevado crescimento populacional, que aumentou a demanda global de energia; e ao enfrentamento das mudanças climáticas, que vem alterando o foco do desenvolvimento (SOLAUN; CERDÁ, 2020; IRENA, 2020). Em particular, a energia eólica, como fonte renovável de energia, não produz emissões e é uma excelente alternativa em termos ambientais à produção convencional de eletricidade a partir de combustíveis como petróleo, carvão ou gás natural. Essa preferência pela tecnologia eólica, entre as demais fontes de energia renovável, deve-se à sua capacidade de gerar grandes quantidades de eletricidade a custos competitivos (SIMAS; PACCA, 2014; DE SOUZA *et al.*, 2021; REN, 2021). Em 2020, houve redução de 48% e 54% dos custos globalizados de eletricidade da geração de energia eólica *onshore* (portanto construção no solo) e *offshore* (construção localizada no mar), respectivamente (REN, 2021).

De acordo com relatório da *Global Wind Report*, a instalação total de energia eólica global *onshore* foi de 842 GW em 2022, crescimento de 8% em relação ao ano anterior (Figura 1). Este aumento foi incentivado pela ampliação nos dois maiores mercados mundiais, China e Estados Unidos. Em 2020 foi adicionado, globalmente, 86,9 GW de capacidade eólica *onshore*, expansão de 59% da capacidade comparada ao ano de 2019 e projeta-se o crescimento médio anual de 4% até 2025 (GWEC, 2021).

Figura 1 – Evolução da capacidade eólica instalada no mundo (em GW).



Fonte: GWEC, 2023.

Espera-se que as novas instalações de energia eólica global ultrapassem 100 GW em 2023 e que 680 GW de novas capacidades sejam adicionadas nos próximos cinco anos (GWEC, 2023). Isso equivale a mais de 136 GW de novas instalações por ano até 2027.

Segundo o relatório da *Global Wind Report*, cinco pilares sustentarão esse nível de sucesso nos próximos cinco anos.

- A urgência da Europa em substituir os combustíveis fósseis por renováveis para obter segurança energética após a invasão russa à Ucrânia.
- Um forte impulso para energias renováveis nos Estados Unidos nos próximos dez anos, ocasionado principalmente pela Lei de Redução da Inflação (IRA), aprovada em Agosto de 2022.
- O compromisso da China em promover a expansão das energias renováveis em sua matriz energética, que representará mais de 80% do novo consumo de eletricidade total até o final de 2025.
- Governos alinhados para as oportunidades que a energia eólica *offshore* pode proporcionar, com ambição crescente para a maturidade e desenvolvimento dos mercados.
- Forte crescimento em grandes mercados emergentes *onshore* e *offshore*, a partir do meio desta década.

Em relação ao crescimento na América latina, este permaneceu estável em 2022 com novas instalações atingindo 5,2 GW, o segundo maior na história. Tal crescimento foi principalmente impulsionado pelo Brasil, que representou cerca de 80% da capacidade adicional da região. O forte crescimento do país esteve ligado a projetos desenvolvidos em regime de leilões regulados pelo serviço público e dos acordos de compra e venda de energia limpa (*Power Purchase Agreement*, PPA). Apesar da instabilidade econômica na Argentina, novas instalações na América latina (5 GW) são prováveis em 2023-2027, impulsionado principalmente pelo crescimento contínuo no Brasil e no Chile, bem como na conclusão de projetos na Colômbia. Espera-se a adição de 26,5 GW de energia *onshore* nesta região nos próximos cinco anos, com Brasil, Chile e Colômbia contribuindo com 78% desse incremento (GWEC, 2023).

O Brasil é um país que se destaca pela rápida e expressiva implantação de parques eólicos *onshore* (DIÓGENES *et al.*, 2020). Entre 2008 e 2022, a capacidade instalada nacional cresceu 75 vezes, atingindo 25.631 MW e liderando o crescimento de energia eólica na América Latina (GWEC, 2023). A previsão é que, até 2026, considerando apenas os leilões já realizados, a energia eólica avance até cerca de 32,2 GW (ABEEÓLICA, 2021).

Em 2021, o Brasil esteve em sexto lugar no Ranking Mundial de capacidade total instalada *onshore* com 21,5 GW (Figura 2), crescimento de 21% em relação ao ano anterior (GWEC, 2022). No ranking que contabiliza especificamente a nova capacidade instalada no ano, o Brasil aparece na terceira posição pelo segundo ano consecutivo. A expansão eficiente da indústria de energia eólica no Brasil é justificada pelo expressivo investimento de empresas que compõem essa cadeia produtiva, na qual foram investidos R\$ 20,6 bilhões, em 2020, representando 45% dos investimentos realizados em energias renováveis no país; ainda, justifica-se pela ótima qualidade dos ventos, evidenciado pelo fator de capacidade acima da média mundial. Tem-se que o fator de capacidade é a proporção entre a geração efetiva da usina em um intervalo de tempo e a capacidade total neste intervalo, portanto, este dado mede a produtividade dos ventos; e, em 2020, o Brasil atingiu o fator de 40,6%, valor acima da média mundial de 35% (ABEEÓLICA, 2021).

Figura 2 – Ranking da capacidade total instalada de energia *onshore*.



Fonte: GWEC, 2022.

A expansão da capacidade instalada de geração de energia eólica *onshore*, associada às contínuas inovações e melhorias de tecnologia, resulta no aumento do diâmetro do rotor e da altura das torres eólicas (IRENA, 2019). A pressão sobre os preços tem funcionado como um impulsionador da inovação tecnológica, empresas chinesas continuam a lançar novas turbinas com maior potência e rotores maiores para permanecerem competitivas. Em 2023, a empresa Sany lançou o protótipo 230/8-11MW em Pequim, a maior turbina eólica *onshore* do mundo (GWEC, 2023). Torres de maior altura requerem fundações mais robustas para suportar maiores carregamentos, necessitando de grandes volumes de concreto, uma vez que a qualidade dos recursos eólicos melhora significativamente com o aumento da altura das turbinas e este aumento garante uma distância segura entre pás mais longas e o solo (LANTZ *et al.*, 2019).

Em idade precoce, a temperatura em estruturas maciças de concreto pode atingir mais de 70 °C, tendo em vista as reações químicas de hidratação do cimento serem exotérmicas (BRIFFAUT *et al.*, 2012). No entanto, uma maior diferença de temperatura entre o interior e o exterior do concreto provoca fissuras térmicas, que afetam a segurança estrutural das edificações (RIDING *et al.*, 2014). Como o concreto possui baixa condutividade térmica, o calor interno oriundo do processo de hidratação não é facilmente distribuído, enquanto o calor externo se dissipa mais rapidamente, tendo em vista a transferência de calor na superfície do concreto com o meio (LI; NIE; WANG, 2014). Quando a deformação de contração térmica excede a capacidade de deformação de tração do concreto, ocorre sua fissuração precoce (AN *et al.*, 2017).

Para controlar o gradiente de temperatura e evitar o risco de fissuração das estruturas, métodos preventivos devem ser considerados, como o uso de materiais cimentícios suplementares, o uso de cimento Portland de baixo calor de hidratação, o pré-resfriamento do agregado antes da mistura do concreto, o pós-resfriamento do concreto com o uso de serpentinas internas ao compósito cimentício, a adoção de isolamento térmico superficial (YANG; WANG; ZHOU, 2007; TASRI; SUSILAWATI, 2019; HAMID; CHORZEPA, 2020; SMOLANA *et al.*, 2021). Dentre as medidas de pré-resfriamento, considera-se a aplicação de nitrogênio líquido, para resfriamento dos agregados, como inovação na indústria eólica, ainda que este material tenha sido utilizado pela primeira vez para pré-resfriar o concreto há quase 30 anos (GAJDA; SUMODJO, 2012), verifica-se que não há o domínio da tecnologia por parte dos empreiteiros, no Brasil. Assim, o presente artigo objetiva analisar o comportamento térmico e as propriedades físico-mecânicas de concretos aplicados a fundações de torres eólicas *onshore*, a partir da avaliação do uso de nitrogênio líquido como método de pré-resfriamento.

Apesar das vantagens da aplicação de nitrogênio líquido como método de pré-resfriamento do concreto massa, poucos estudos abordam este uso. Harith, Hassan e Hasan (2022) recomendam que sejam

desenvolvidas mais investigações relacionadas aos efeitos do resfriamento com nitrogênio líquido sobre as propriedades endurecidas, microestruturas e desempenho do concreto.

2. MATERIAIS E MÉTODO

2.1. Seleção de materiais

Foi utilizado o cimento Portland de alto forno com classe de resistência de 40 MPa (CP III 40 RS), produzido com adição de 35% a 75% de escória granulada de alto forno e usualmente aplicado em obras de fundações de estruturas de concreto massa devido ao baixo calor de hidratação desse cimento. O agregado miúdo usado foi de origem natural, proveniente de leito de rio. Utilizou-se, como agregado graúdo, uma rocha basáltica britada com dimensão máxima característica de 19 mm. Foi utilizado aditivo plastificante de pega normal, o qual promove a redução da retração e aparecimento de fissuras.

Para pré-resfriamento dos concretos produzidos, foi utilizado nitrogênio líquido e gelo em escamas, sendo este produto fabricado sem especificações técnicas. O nitrogênio líquido refrigerado (N_2) foi produzido e fornecido pelo Laboratório de Criogenia da Universidade Federal do Ceará (UFC), conforme Figura 3. Suas propriedades físico-químicas são apresentadas na Tabela 1.

Figura 3 – a) Fornecimento de nitrogênio líquido; b) Frasco dewar para armazenamento e transporte de N_2 .



Fonte: Autores, 2023.

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do Nitrogênio líquido (N₂) utilizado.

Propriedade	Nitrogênio líquido
Aspecto	Líquido criogênico, incolor, inodoro
Peso específico do líquido no ponto de ebulição e 1 atm (kg/m ³)	808,5 kg/m ³
Ponto de fusão a 10 psig (°C)	-210,0
Ponto de ebulição a 10 psig (°C)	-195,8
Peso molecular	28,01
Temperatura crítica (°C)	-149,9

Fonte: Autores, 2023.

2.2. Método de pesquisa

Para o presente artigo foram produzidas quatro variações de um mesmo traço de concreto, sendo as proporções dosadas por construtora local, onde se variou o método de pré-resfriamento dos materiais. Para o teste intitulado como T1, não foi utilizado método de resfriamento, sendo as amostras desse grupo nomeadas como referências ou amostras-padrão; para a variação T2, utilizou-se gelo em escamas em substituição total à água de amassamento do traço. Foi aplicado nitrogênio líquido, como solução para resfriamento dos materiais, nas amostras T3 e T4, sendo resfriado o concreto fresco ao final do processo de mistura para T3 e resfriado os agregados e a água de amassamento ao longo do procedimento de execução do concreto T4. A Tabela 2 apresenta o resumo dos métodos utilizados.

Tabela 2 – Métodos de pré-resfriamento utilizados nos concretos produzidos.

Nomenclatura das variações do traço	Método de resfriamento	Material resfriado	Quantidade de material para resfriamento / m³ de concreto
T1	Sem resfriamento (Referência)	-	0 kg
T2	Gelo em escamas	Concreto	193 kg
T3	Nitrogênio líquido	Concreto	386 l
T4	Nitrogênio líquido	Agregados e água	406 l

Fonte: Autores, 2023.

A fim de avaliar as propriedades físico-mecânicas dos concretos produzidos, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões 10 cm x 20 cm e mantidos em cura úmida por 28 dias. Foram executados os ensaios listados na Tabela 3, conforme as respectivas normas.

Tabela 3 – Ensaio físico-mecânicos dos concretos.

Ensaio	Norma	Amostragem (por variação de traço e idade)
Absorção, índice de vazios e massa específica aos 28 dias	ABNT NBR 9778:2009	3
Resistência à compressão axial nas idades de 7 dias e 28 dias de cura	ABNT NBR 5739:2018	3

Fonte: Autores, 2023.

Para avaliação térmica das amostras produzidas, foi utilizado calorímetro semi-adiabático presente no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFC (Figura 4), o qual indica a temperatura interna da amostra, por meio de termopares do tipo K inseridos no núcleo do concreto fresco, ao longo do tempo de análise. Os sensores utilizados têm baixo custo e ampla disponibilidade de compra; apresentam sensibilidade de aproximadamente $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ e são adequados para medição contínua desde $-200\text{ }^\circ\text{C}$ até $1260\text{ }^\circ\text{C}$. O calorímetro empregado foi calibrado previamente, onde se utilizou água quente como meio de calibração, conforme método indicado pela norma BS EN 12930:2018 parte 14.

Figura 4 – Calorímetro semi-adiabático (Autores, 2023).



Fonte: Autores, 2023.

As temperaturas foram medidas com os aquisitores de dados (equipamentos que coletam e armazenam informações em sua memória para tratá-los através de um computador) a cada hora ao longo de sete dias, portanto foram realizadas 168 leituras a cada amostra de concreto avaliada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Ensaio físico-mecânicos

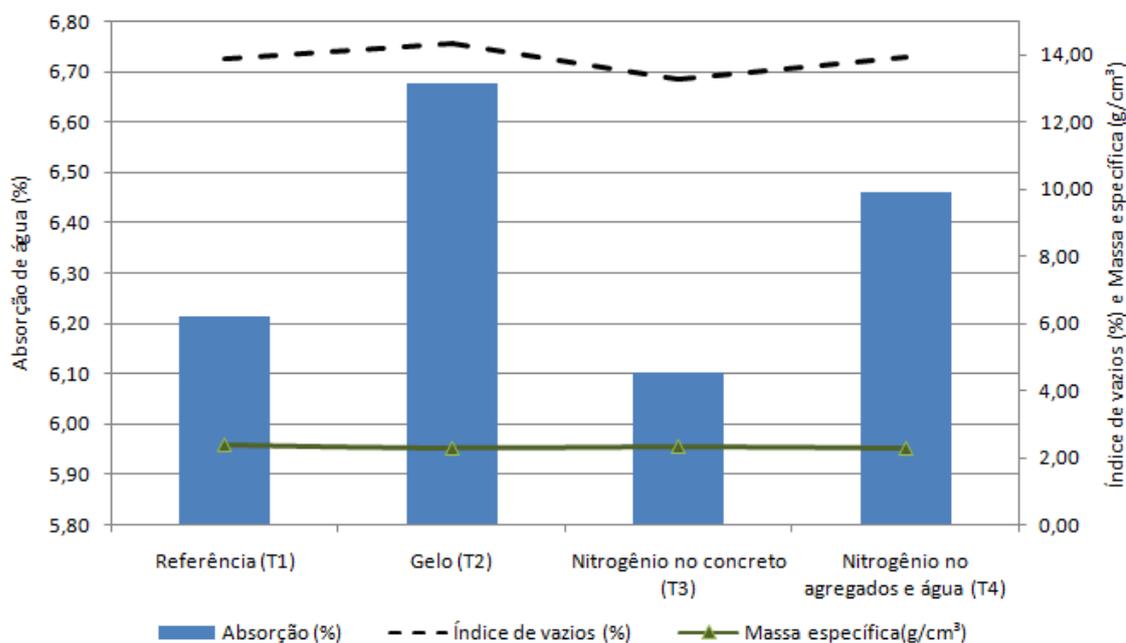
Para avaliação das propriedades físicas dos concretos produzidos, a Tabela 4 indica os valores médios de absorção de água, índice de vazios e massa específica das variações de traço após 28 dias de cura úmida, com seus respectivos desvios padrões e coeficientes de variação. A Figura 5 apresenta a análise gráfica dos resultados obtidos, onde se observam menores valores de absorção de água e índice de vazios para a variação de traço T3, onde se resfriou o concreto fresco com nitrogênio líquido. O menor valor de massa específica, portanto o grupo menos denso foi T2, traço que utiliza gelo como método de pré-resfriamento. A variação T2 foi aquela que apresentou maiores valores de absorção de água e índice de vazios, o que, de maneira geral, justifica a menor densidade deste concreto. Em laboratório, observou-se a exsudação da água de amassamento para T2 quando da moldagem dos corpos de prova. A hipótese levantada é que haja evaporação parcial da água do traço para este método de resfriamento.

Tabela 4 – Resultados médios para os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Nomenclatura das variações do traço	Absorção (%) (desvio padrão); coeficiente de variação	Índice de vazios (%) (desvio padrão); coeficiente de variação	Massa específica (g/cm³) (desvio padrão); coeficiente de variação
T1	6,21 (± 0,15); 2,42%	13,89 (± 0,28); 2,03%	2,37 (± 0,01); 0,30%
T2	6,68 (± 0,81); 12,12%	14,34 (± 1,50); 10,47%	2,29 (± 0,02); 0,98%
T3	6,10 (± 0,15); 2,49%	13,30 (± 0,28); 2,11%	2,31 (± 0,01); 0,51%
T4	6,46 (± 0,25); 3,92%	13,94 (± 0,44); 3,15%	2,30 (± 0,01); 0,57%

Fonte: Autores, 2023.

Figura 5 – Resultados obtidos para as propriedades físicas dos concretos (Autores, 2023).



Fonte: Autores, 2023.

A Tabela 5 apresenta os valores médios de resistência mecânica à compressão axial dos concretos produzidos nas idades de ruptura de 7 dias e 28 dias, com seus respectivos desvios padrões e coeficientes

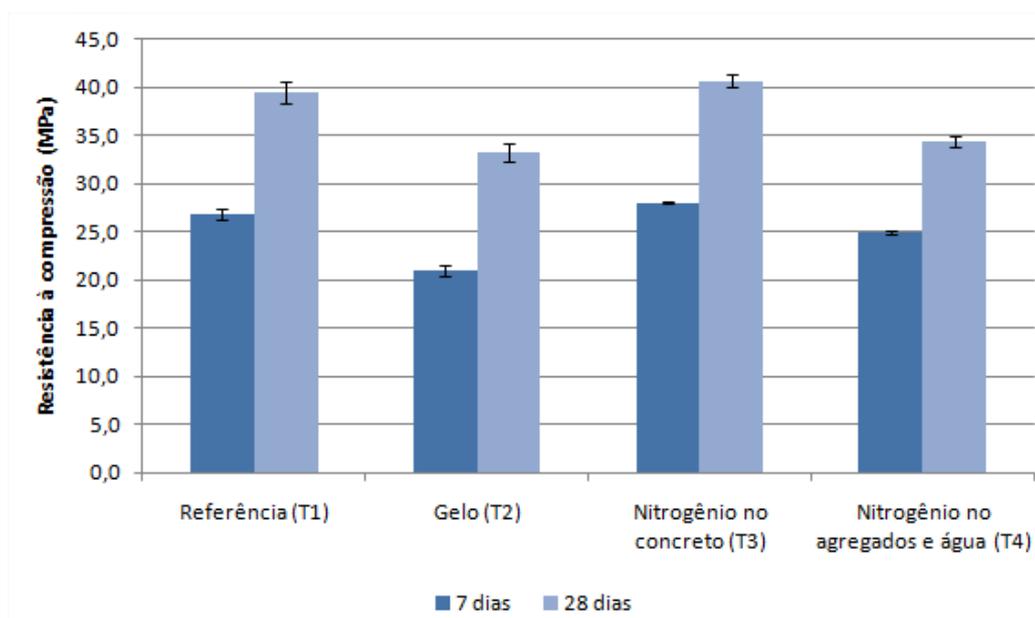
de variação. A Figura 6 ilustra esses valores, com seus erros padrões indicados por barras, e apresenta o crescimento da resistência à compressão axial à medida que se aumenta a idade do concreto para as diferentes variações.

Tabela 5 – Resistência à compressão axial média em diferentes idades de ruptura

Nomenclatura das variações do traço	Resistência à compressão axial média (MPa) (desvio padrão); coeficiente de variação	
	7 dias	28 dias
T1	26,9 (\pm 0,84); 3,1%	39,5 (\pm 1,85); 4,7%
T2	20,9 (\pm 0,95); 4,5%	33,3 (\pm 1,25); 3,7%
T3	28,0 (\pm 0,07); 0,3%	40,7 (\pm 1,17); 2,9%
T4	25,0 (\pm 0,16); 0,6%	34,4 (\pm 0,98); 2,8%

Fonte: Autores, 2023.

Figura 6 – Resultado médio de resistência à compressão axial (Autores, 2023).



Fonte: Autores, 2023.

Para as idades de 7 dias e 28 dias de cura, observam-se maiores valores de resistência à compressão axial na variação T3, em que houve aplicação de nitrogênio líquido no concreto fresco ao final do processo de mistura; e têm-se menores valores para amostras com gelo (T2). Para o método de pré-resfriamento dos agregados e da água de amassamento com nitrogênio líquido (T4), foram obtidos valores de resistência à compressão axial menores que os resultados observados para as amostras de referência. A hipótese levantada é que o resfriamento com N₂ provoque microfissuras no agregado graúdo, quando da aplicação direta neste material, reduzindo a resistência do concreto. Esse comportamento se manteve nas diferentes idades de análise.

Realizou-se análise de variância, ANOVA, para os valores obtidos, onde se verificou diferença estatisticamente significativa para as idades de 7 e 28 dias, conforme Tabela 6. Em seguida, foi realizada a comparação múltipla entre as médias por meio do teste de Tukey onde se observou diferença significativa entre T1 e T2; T2 e T3; T2 e T4; T3 e T4, aos 7 dias, e diferença entre os grupos T1 e T2; T2 e T3; T3 e T4; T1 e T4, aos 28 dias, devido à redução na resistência mecânica das variações T2 e T4 verificada pelos maiores índices de vazios, conforme Tabela 4 supracitada. A Tabela 6 apresenta a significância dos resultados obtidos para as idades em análise.

Tabela 6 – Teste de variância (ANOVA) para resistência à compressão axial em diferentes idades

Parâmetro	Idade de cura (dias)	F	Valor-p	Significância
Método de resfriamento	7	61,67	0,000021	Significativo
Método de resfriamento	28	18,405	0,001063	Significativo

Fonte: Autores, 2023.

3.2. Estudo térmico

A Tabela 7 apresenta as temperaturas máximas e mínimas obtidas nos concretos avaliados ao longo de sete dias em calorímetro semi-adiabático. Observa-se maior pico de temperatura (34 °C, 48 h após concretagem) para a variação de traço referência (T1), sendo este concreto produzido sem sistema de resfriamento, o que valida a necessidade de redução da temperatura do concreto massa. As amostras T2 e T4 apresentam menores picos de temperatura (31 °C, 36 h após concretagem), sendo utilizado, respectivamente, gelo em escamas e nitrogênio líquido, como sistemas de pré-resfriamento.

Tabela 7 – Temperaturas máximas e mínimas obtidas em estudo térmico

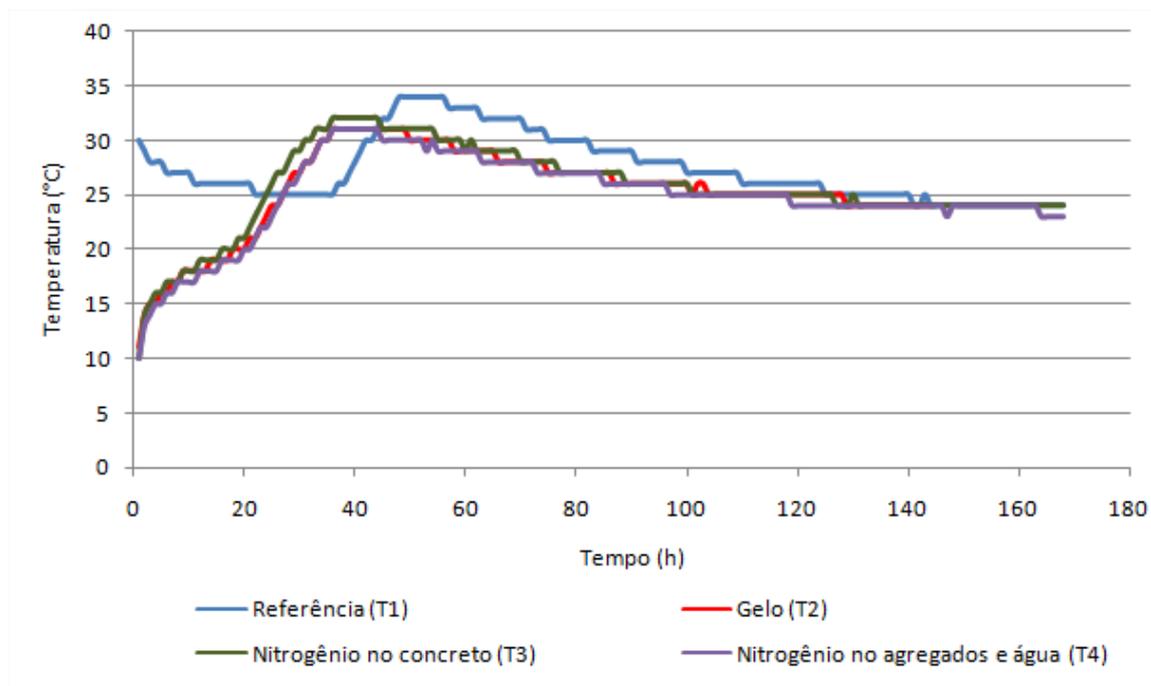
Nomenclatura das variações do traço	Temperatura de lançamento (°C)	Temperatura máxima (°C)	Varição de Temperatura, T_{máx} - T_{lançamento} (°C)	Horário de T_{máx} (h)
T1	32	34	2	48
T2	10	31	21	36
T3	10	32	22	36
T4	10	31	21	36

Fonte: Autores, 2023.

A curva de perfil térmico, obtida para as temperaturas localizadas no centro da amostra de concreto, pode ser observada na Figura 7, onde se visualiza o comportamento térmico das variações de traço ao longo do tempo. Constatam-se maiores valores de temperatura para a variação T1, traço de referência, em comparação com as amostras resfriadas. Observa-se que o uso de nitrogênio líquido no concreto (T3) apresentou maiores valores de temperatura quando comparado à T2 e T4, obtendo-se, ainda, menores resultados de temperatura para este último. Este resultado justifica-se pelo maior consumo de nitrogênio líquido em T4 (406 litros por metro cúbico de concreto) em comparação à T3 (386 litros de N₂ por metro cúbico de concreto). Segundo Kattoof, Hassan, Hasan (2022), a temperatura de resfriamento do concreto

depende do consumo de nitrogênio líquido utilizado. Portanto, quanto maior o consumo de N_2 , menores as temperaturas a serem observadas.

Figura 7 – Perfil térmico de concretos ao longo do tempo (Autores, 2023).



Fonte: Autores, 2023.

4. CONCLUSÕES

No presente artigo foram analisados o comportamento térmico e as propriedades físico-mecânicas de concretos aplicados a fundações de torres eólicas *onshore* para diferentes métodos de pré-resfriamento. Foi avaliada a eficiência do uso de nitrogênio líquido e de gelo em escamas, a fim de mitigar a ocorrência de manifestações patológicas provenientes do elevado gradiente de temperatura.

Nos ensaios físico-mecânicos, observaram-se menores valores de absorção de água e índice de vazios para a variação de traço T3 e menor valor de massa específica para T2, sendo este grupo aquele com maiores valores de absorção de água e índice de vazios, possivelmente devido à exsudação da água de amassamento para T2 quando da moldagem dos corpos de prova. Foram obtidos maiores valores de resistência à compressão axial na variação T3 aos 7 dias e 28 dias de cura e menores valores para amostras com gelo (T2). Para o método de pré-resfriamento dos agregados e da água de amassamento com nitrogênio líquido (T4), foram obtidos valores de resistência à compressão axial menores que os resultados observados para as amostras de referência. Os resultados físicos corroboram para a compreensão dos resultados mecânicos, tendo em vista que o menor índice de vazios, portanto, a menor porosidade das amostras T3 resultou em maior resistência à compressão do referido traço ao longo do tempo. A partir dos resultados obtidos nos ensaios físico-mecânicos sugere-se a aplicação de nitrogênio líquido no concreto fresco como método mais adequado para pré-resfriamento do concreto.

Os métodos avaliados apresentaram eficiência relevante quando analisada a curva de perfil térmico dos concretos desenvolvidos, ao longo do tempo, verificando-se menores temperaturas de lançamento para as variações com gelo em escamas (T2) e nitrogênio líquido (T3 e T4), em comparação com a amostra de referência (T1), portanto sem resfriamento. Observa-se que o uso de nitrogênio líquido no concreto (T3) apresentou maiores valores de temperatura quando comparado à T2 e T4, obtendo-se, ainda, menores

resultados de temperatura para este último. Verificou-se que o maior consumo de nitrogênio líquido por metro cúbico de concreto acarreta em maior redução da temperatura deste compósito, sendo o uso de nitrogênio líquido uma alternativa promissora como método de pré-resfriamento do concreto massa quando em regiões de clima quente, conforme evidenciam Harith, Hassan e Hasan (2022).

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. Energia Eólica: os bons ventos do Brasil. **Infovento 23**. Brasil, 23 nov. 2021. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/>. Acesso em: 28 jun. 2023. Publicado em 2021.

AN, J.; KIM, S. S.; NAM, B. H.; DURHAM, S. A. Effect of aggregate mineralogy and concrete microstructure on thermal expansion and strength properties of concrete. **Applied Sciences**, v. 7, n. 12, p. 1307, 2017.

BRIFFAUT, M.; BENBOUDJEMA, F.; TORRENTI, J. M.; NAHAS, G. Effects of early-age thermal behaviour on damage risks in massive concrete structures. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 16, n. 5, p. 589-605, 2012.

DE SOUZA, N. B. P.; DOS SANTOS, J. V. C.; NASCIMENTO, E. G. S.; SANTOS, A. A. B.; MOREIRA, D. M. Long-range correlations of the wind speed in a northeast region of Brazil. **Energy**, p. 122742, 2021.
DIÓGENES, J. R. F.; RODRIGUES, J. C.; DIÓGENES, M. C. F.; CLARO, J. Overcoming barriers to onshore wind farm implementation in Brazil. **Energy Policy**, v. 138, p. 111165, 2020.

GAJDA, J.; SUMODJO, F. Precooling Mass Concrete with Liquid Nitrogen. **Concrete international**, v. 34, n. 7, 2012.

GWEC. Global Wind Energy. GWEC | **GLOBAL WIND REPORT 2021**. 2021. Disponível em <<https://gwec.net/global-wind-report-2021/>>. Acesso em: 05 jun. 2023. Publicado em 2021.

GWEC. Global Wind Energy. GWEC | **GLOBAL WIND REPORT 2023**. 2023. Disponível em <<https://gwec.net/globalwindreport2023>>. Acesso em: 25 jun. 2023. Publicado em 2023.

HAMID, H.; CHORZEPA, M. G. Quantifying maximum temperature in 17 mass concrete cube specimens made with mixtures including metakaolin and/or slag. **Construction and Building Materials**, v. 252, p. 118950, 2020.

HARITH, I. K.; HASSAN, M. S.; HASAN, S. S. Liquid nitrogen effect on the fresh concrete properties in hot weathering concrete. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 7, n. 1, p. 1-13, 2022.

IRENA - International Renewable Energy Agency. Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects. **A Global Energy Transformation paper**. Abu Dhabi, 2019. (978-92-9260-155-3).

IRENA - International Renewable Energy Agency. 10 Years: Progress to Action. **International renewable energy agency**, Abu Dhabi, 2020. Disponível em <<https://irena.org/publications/2020/Jan/10-Years-Progress-to-Action>>. Acesso em: 05 jun. 2023. Publicado em 2020.

KATTOOF, I.; HASSAN, M. S.; HASAN, S. S. Effects of Liquid Nitrogen Cooling on the Microstructure Properties of Nano-Modified Concrete Under Hot Conditions. **Arabian Journal for Science and Engineering**, p. 1-15, 2022.

LANTZ, E.; ROBERTS, O.; NUNEMAKER, J.; DEMEO, E.; DYKES, K.; SCOTT, G. **Increasing Wind Turbine Tower Heights: Opportunities and Challenges**. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-5000-73629. 2019.

LI, Y.; NIE, L.; WANG, B. A numerical simulation of the temperature cracking propagation process when pouring mass concrete. **Automation in construction**, v. 37, p. 203-210, 2014.

REN21. 2021. **Renewables 2021 Global Status Report** (Paris: REN21 Secretariat). ISBN 978-3-948393-03-8

RIDING, K. A.; POOLE, J. L.; SCHINDLER, A. K.; JUENGER, M. C.; FOLLIARD, K. J. Statistical determination of cracking probability for mass concrete. **Journal of materials in civil engineering**, v. 26, n. 9, p. 04014058, 2014.

SIMAS, M.; PACCA, S. Assessing employment in renewable energy technologies: A case study for wind power in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 83-90, 2014.

SMOLANA, A.; KLEMCZAK, B.; AZENHA, M.; SCHLICKE, D. Early age cracking risk in a massive concrete foundation slab: Comparison of analytical and numerical prediction models with on-site measurements. **Construction and Building Materials**, v. 301, p. 124135, 2021.

SOLAUN, K.; CERDÁ, E. Impacts of climate change on wind energy power – Four wind farms in Spain. **Renewable energy**, v. 145, p. 1306-1316, 2020.

TASRI, A.; SUSILAWATI, A. Effect of material of post-cooling pipes on temperature and thermal stress in mass concrete. In: **Structures**. Elsevier, 2019. p. 204-212.

YANG, H.; WANG, Y.; ZHOU, S. Anti-crack performance of low-heat Portland cement concrete. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.**, v. 22, n. 3, p. 555-559, 2007.

ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE HIDROGÊNIO JUNTAMENTE A PLANTA EÓLICA NO BRASIL

Autor: Vitor Rodrigues Miranda

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Curso de Especialização em Energias Renováveis

Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - CEP: 90619-900 - Porto Alegre - RS - Brasil

Email: vitormiranda2003@gmail.com

Orientador: Prof. Ronaldo Santos Custódio

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

Curso de Especialização em Energias Renováveis

Av. Ipiranga, 6681 - Prédio 30 - Sala 204 - CEP: 90619-900 - Porto Alegre - RS - Brasil

Email: ronaldo.santos.custodio@gmail.com

RESUMO

O trabalho traz uma análise econômica para instalação de plantas de eletrólise para produção de hidrogênio juntamente a geração eólica, apresentando o custo do hidrogênio para que o projeto possua viabilidade equivalente a uma planta puramente eólica. A produção por eletrólise utilizando energia elétrica renovável caracteriza o produto final como hidrogênio verde. Foi dimensionado um parque eólico de 310 MW e eletrolisadores do tipo membrana polimérica (PEM), com três cenários de potência (22, 44 e 66 MW). O resultado apresenta o custo do hidrogênio para diferentes cenários, a saber: CAPEX dos eletrolisadores, capacidade instalada e estratégia de preferência na geração de hidrogênio (*trade-off* em relação a energia elétrica disponibilizada à rede). O procedimento de cálculo avaliou o impacto positivo da geração de hidrogênio em um panorama futuro em que cortes na produção (*curtailment*) são mais frequentes devido ao avanço da penetração das energias renováveis intermitentes na matriz elétrica brasileira. Portanto as diferentes potências instaladas de eletrolisadores alteram a contribuição nos cortes de produção. Avaliou-se também o impacto da dimensão da estrutura de armazenamento. Os resultados estão de acordo com as referências avaliadas, ficando na faixa de potencial real de implementação de novos investimentos no curto prazo, em especial nos momentos em que o preço da energia elétrica estejam em patamares reduzidos.

Palavras-chave: Hidrogênio verde, *curtailment*, geração eólica, viabilidade técnico-econômica na geração de hidrogênio.

ABSTRACT

This paper presents an economic analysis for the installation of electrolysis plants for hydrogen production coupled with wind power generation, aiming to determine the cost of hydrogen required for the project to be as viable as a purely wind generation plant. The production through electrolysis using renewable electricity characterizes the final product as green hydrogen. A 310 MW wind farm and polymer membrane electrolyzers (PEM) were dimensioned, considering three electric power output scenarios: 22 MW, 44 MW, and 66 MW. The results show the cost of hydrogen for different scenarios, including the capital expenditures (CAPEX) of the electrolyzers, installed capacity, and the preferred hydrogen generation strategy (trade-off concerning the electricity fed into the grid). The calculation procedure measured the positive impact of hydrogen generation in a future scenario where production cuts (curtailment) become more frequent due to the increasing penetration of intermittent renewable energies in the Brazilian electric grid. Thus, different installed electrolyzer capacities affect the contribution to production cuts. The study also evaluated the impact of storage infrastructure size. The results align with the assessed references, falling within the range of actual potential for implementing new investments in the short term, especially during periods of reduced electricity prices.

Keywords: Green hydrogen, curtailment, wind power, technical-economic viability in hydrogen generation.

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica apresentou rápido crescimento no Brasil desde a última década e, segundo previsões do Plano Decenal de Energia (EPE, 2022), deve continuar em ritmo acelerado até 2031. Por outro lado, o hidrogênio vem constantemente sendo apresentado como solução para viabilizar a descarbonização global nos acordos internacionais, especialmente após o acordo de Paris na COP 21. Portanto o início da década mostra-se um momento oportuno para análises da complementariedade dos dois recursos.

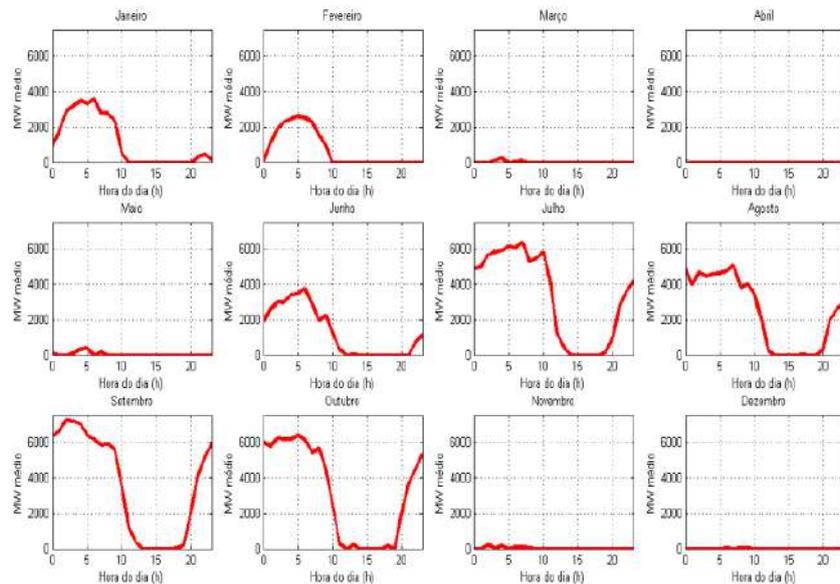
Com o aumento rápido e consistente na geração de energia elétrica proveniente de fonte renováveis intermitentes no Brasil, a componente potência ganha complexidade para o sistema interligado. Mesmo com a ampliação dos sistemas de transmissão, se torna cada vez mais comum picos de demanda em exijam do sistema despachos adicionais ou situações de potência restringida (*curtailment*), seja por limitações na potência gerada, seja por congestionamento da rede de transmissão no pico de produção. De forma abrangente, os sistemas de armazenamento de energia são apresentados como solução para essa questão, com destaque para hidrelétricas reversíveis e baterias. CIGRÉ (2018), por exemplo, citou em seu relatório anual o armazenamento como fator chave para promoção da flexibilidade e suporte à integração das fontes renováveis. Uma terceira alternativa para permitir o avanço das energias renováveis no sistema interligado é absorver picos de produção para geração de hidrogênio verde.

Além da utilização para modulação da intermitência das fontes renováveis perante a rede (*power-to-power*), o hidrogênio pode ser utilizado em mistura com gás natural para queima (*power-to-gas*), insumo na produção de combustíveis avançados, como diesel verde tipo HVO (*Hydrotreated Vegetable Oil*), insumo industrial, como na siderurgia e produção amônia, entre outras aplicações. Essa flexibilidade e permeabilidade entre os setores energéticos (elétrico e combustível), coloca o hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis com frequência como única solução atingimento de metas descarbonização. Com tamanha importância do tema, políticas públicas vêm sendo implementadas pelos países visando desenvolvimento tecnológico e regulatório. No caso brasileiro, a concretização veio através do Programa Nacional de Hidrogênio Verde (PNH2), lançado em junho de 2021.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E MÉTODO DO ESTUDO

O trabalho possui o objetivo de analisar a complementariedade entre hidrogênio e geração eólica partindo de um estudo econômico de um parque eólico padrão e, posteriormente, avaliando o impacto ao se adicionar a produção complementar de hidrogênio. O resultado é exibido sob a ótica de que o projeto possui uma segunda renda através da comercialização do hidrogênio, com valor unitário (R\$/kg) que varia de acordo com os *inputs* explorados no trabalho. O benefício esperado com a utilização da planta complementar está ligado principalmente ao aproveitamento de energia que não poderia ser utilizada por restrições na rede. Para mensuração desse impacto positivo, há necessidade de discretização de valores de *curtailment* no nível de barramento do Sistema Interligado Nacional (SIN) ao longo do tempo, informação ainda não disponível de forma estruturada pela Operação Nacional do Sistema (ONS). Portanto destaca-se Pinho (2017), que apresenta o resultado esperado para *curtailment* no Sistema Interligado Nacional (SIN) de acordo com o avanço em larga escala das energias renováveis intermitentes. O trabalho propõe a produção de hidrogênio em ocasiões em que haveria excedente e corte na produção eólica no nordeste brasileiro em um cenário futuro. A Figura 1 ilustra o resultado obtido, apresentado em cortes médios de geração em escala horária para 12 meses do ano. Nota-se a presença de corte em 7 meses, sendo mais intenso entre 20h e 10h e com pico máximo em setembro, mês conhecido pela incidência das maiores médias da velocidade do vento no Nordeste. Em termos percentuais, o pico de 7,3 GW representa 30% na potência instalada de 24 GW prevista para o Nordeste no mesmo trabalho.

Figura 1 - *Curtilment* mês a mês.



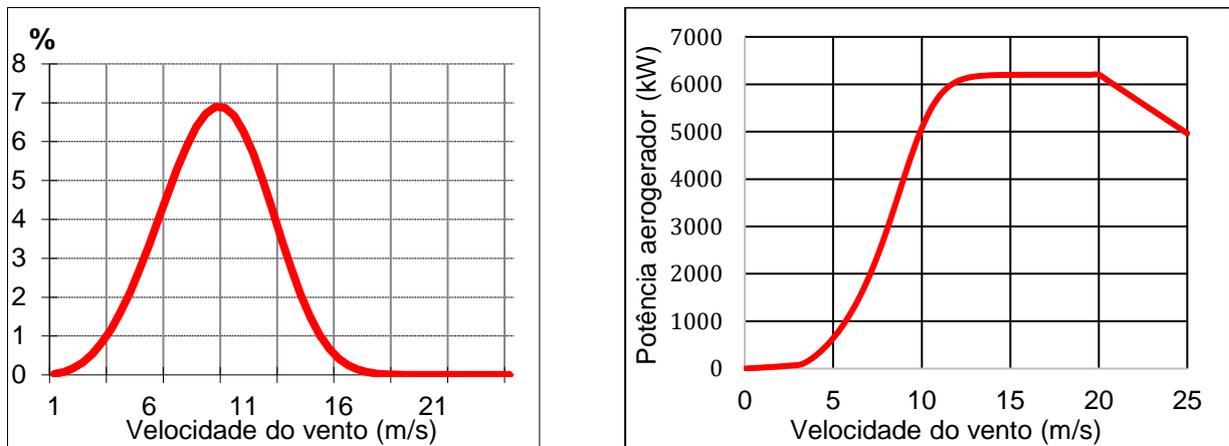
Fonte: Pinho, 2017

O presente estudo usa os perfis de cortes obtidos na Figura 1 como referência, como se o barramento onde se deseja conectar a planta estivesse na mesma situação prevista por Pinho (2017). Conforme mencionado, em termos percentuais o corte na produção chega ao pico de 30%. Ao adicionar-se plantas de geração de hidrogênio no sistema, o corte na geração naturalmente reduz, visto que a energia elétrica pode ser direcionada aos eletrolisadores ao invés da rede de transmissão. Usando o caso extremo para fim ilustrativo, se a potência instalada de eletrolisadores for 30% da geração eólica, os cortes serão nulos.

Para análise econômica, mostra-se necessário seleção de equipamentos disponíveis no mercado e seleção de coeficientes para estatística do potencial eólico do local. O modelo do aerogerador selecionado foi o Siemens-Gamesa SG 6.2-170, de potência nominal de 6,2MW, com base em projetos recentes implementados no nordeste, como de Tucano na Bahia. Também com base nos projetos mais recentes, para potência instalada do complexo eólico foram considerados 50 aerogeradores, totalizando 310 MW e uma eficiência de parque de 85%.

Uma curva sintética de distribuição de frequência do vento foi selecionada, com base na velocidade média de 9,5m/s e fator de forma da curva de Weibull de 3,8, coeficientes característicos para altura do aerogerador selecionado (120m) nos locais de maior potencial eólico no nordeste. A distribuição de potência do aerogerador é apresentado na Figura 2 à direita, com base em dados do fabricante.

Figura 2 – Curva sintética de distribuição do vento e potência eólica Siemens-Gamesa SG 6.2 – 170.



Conforme Custódio (2013), unindo a distribuição de velocidade de vento com a potência do aerogerador em cada velocidade, pode-se calcular a geração anual de energia (EAG), dado em MWh pela equação 1

$$EAG = \sum [f(v) \cdot P(v)] \cdot 8760 \quad (1)$$

onde $f(v)$ é a frequência em que a velocidade v aparece em termos anuais, $P(v)$ é a potência do aerogerador na velocidade v e 8760 é o número de horas do ano. Para expandir a metodologia apresentada de um gerador para todo o complexo eólico, é necessário considerar a influência entre os aerogeradores, as particularidades do terreno de interesse e a estatística da direção do vento, de onde se obtém o valor de eficiência do parque.

Aplicando a equação para os valores da Figura 2, chega-se à geração anual de um aerogerador em 35802 MWh. Ampliando para o complexo completo com 50 aerogeradores e eficiência de parque de 85%, chega-se à geração anual (EAG) de 1.521.605 MWh e fator de capacidade de 56%. Esse valor será nomeado como potencial de geração eólica ao longo do trabalho e refere-se à quantidade de energia que seria distribuída entre rede elétrica e geração de hidrogênio caso o *curtailment* fosse nulo.

A tecnologia de eletrolisador do tipo *Proton Exchange Membrane (PEM)* foi avaliada como a mais adequada para a conversão de energia eólica em hidrogênio, devido ao mais rápido *start-up*, à maior compatibilidade de operação com intermitência e à maior eficiência e segurança em cargas parciais. O modelo do eletrolisador selecionado foi o M5000 da NEL, que utiliza tecnologia PEM com potência de 22MW por unidade, sendo o maior disponível pelo fabricante. Para a potência total de eletrolisadores, o

presente estudo considera as opções de 22MW (uma unidade), 44MW (duas unidades) e 66MW (três unidades), representando, respectivamente, 7,1%, 14,2% e 21,3% da potência instalada do parque eólico. Por um lado, quanto maior a potência, maior a absorção dos picos de corte, por outro lado maior o investimento e maior a ociosidade. A folha de dados a seguir resume os principais parâmetros do equipamento. Em complemento ao consumo energético do eletrolisador disponibilizado na folha de dados do M5000 foi considerado 3 kWh/kg para operação da infraestrutura auxiliar de geração de hidrogênio (Dihn, 2021).

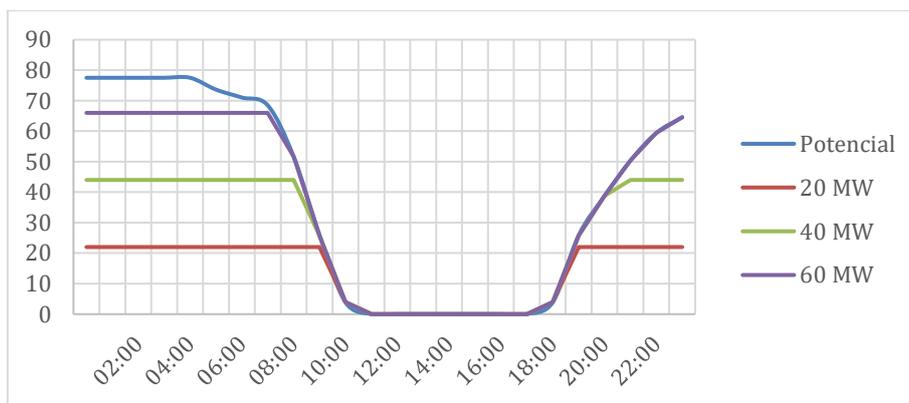
Tabela 1 – folha de dados dos NEL M5000.

Modelo	NEL M5000
Produção líquida de hidrogênio	4920 Nm ³ /h
Potência	22MW
Consumo energético	4,5 kWh/Nm ³
Faixa de potência possível de utilização	10 – 100%
Pureza H2	99,9995%
Pressão de saída H2	30 bar
Tecnologia	PEM

Para o cálculo da produção de hidrogênio deve-se definir a estratégia de alocação do recurso eólico, ou seja, qual é a potência horária disponibilizada para os eletrolisadores. Como primeira opção foi considerado somente os excedentes eólicos, em outras palavras, os cortes previstos na geração, sempre considerando que o local de instalação da planta possui o mesmo perfil proporcional de *curtailment* que foi apresentado na Figura 1.

Como exemplo, A Figura 3 mostra a curva potencial para geração H2 juntamente com a operação das três opções de corte da planta de eletrólise no mês de outubro, quando o corte máximo é de 25% da potência eólica, ou seja, pico de 78 MW no parque proposto de 310MW. À medida que a geração aumenta atinge-se a capacidade nominal dos eletrolisadores, valor que se mantém por algumas horas. Já nos momentos que o corte é zero, a geração de H2 também é nula. O mesmo foi aplicado para o restante dos meses de ano com o objetivo de calcular a geração anual de hidrogênio.

Figura 3 – Geração de hidrogênio para os 3 cenários da estratégia de excedentes (outubro).



Conforme descrito por IAE (2020), a redução no custo nivelado de hidrogênio verde está associado a maiores fatores de capacidade das plantas de eletrolisadores, com captura de percentuais mais elevados da geração das fontes intermitentes. Portanto julgou-se necessário incluir outras duas estratégias alternativas de produção, onde a planta recebe preferência de 25% e 50% da geração do parte eólico. Por

exemplo para preferência de 50% da geração com 66MW em eletrolisadores, caso a planta eólica esteja gerando 100MW, a potência de 50MW estará sendo direcionada para os eletrolisadores, em carga parcial. Já em ocasiões onde a potência eólica esteja em 150MW, a produção de H2 estará na carga máxima de 66MW. Com isso, a

Tabela 2 resume os cenários objeto de análise no presente estudo.

Tabela 2 – Cenários analisados.

Cenário	Descrição
EXCE.22MW	Somente excedentes com planta de 22 MW
EXCE.44MW	Somente excedentes com planta de 44 MW
EXCE.66MW	Somente excedentes com planta de 66 MW
25%.22MW	25% de preferência na geração com planta de 22 MW
25%.44MW	25% de preferência na geração com planta de 44 MW
25%.66MW	25% de preferência na geração com planta de 66 MW
50%.22MW	50% de preferência na geração com planta de 22 MW
50%.44MW	50% de preferência na geração com planta de 44 MW
50%.66MW	50% de preferência na geração com planta de 66 MW

A

v [m/s]	Frequência velocidade	Potência eólica [MW]	Potência no eletrolisador					
			25%.22MW	25%.44MW	25%.66MW	50%.22MW	50%.44MW	50%.66MW
0,0	1%	0	0	0	0	0	0	0
3,0	1%	3	0	0	0	0	0	0
3,5	1%	6	0	0	0	3	3	3
4,0	1%	12	3	3	3	6	6	6
4,5	2%	19	5	5	5	9	9	9
5,0	2%	27	7	7	7	14	14	14
5,5	3%	38	9	9	9	19	19	19
6,0	3%	50	13	13	13	22	25	25
6,5	4%	65	16	16	16	22	32	32
7,0	5%	82	20	20	20	22	41	41
7,5	5%	101	22	25	25	22	44	51
8,0	6%	123	22	31	31	22	44	61
8,5	6%	147	22	37	37	22	44	66
9,0	7%	171	22	43	43	22	44	66
9,5	7%	195	22	44	49	22	44	66
10,0	7%	216	22	44	54	22	44	66
10,5	7%	232	22	44	58	22	44	66
11,0	6%	245	22	44	61	22	44	66
11,5	6%	253	22	44	63	22	44	66
12,0	5%	258	22	44	64	22	44	66
12,5	4%	260	22	44	65	22	44	66
13,0	3%	262	22	44	65	22	44	66
13,5	3%	263	22	44	66	22	44	66
14,0	2%	263	22	44	66	22	44	66
14,5	1%	263	22	44	66	22	44	66
15,0	1%	263	22	44	66	22	44	66
15,5	1%	263	22	44	66	22	44	66
16,0	0%	264	22	44	66	22	44	66
16,5	0%	264	22	44	66	22	44	66

17,0	0%	264	22	44	66	22	44	66
------	----	-----	----	----	----	----	----	----

uni a potência eólica e a potência direcionada aos eletrolisadores com a distribuição do vento no local (função de Weibull) do estudo em base anual, do cenário 25%.22MW ao 50%.66MW, que seguem a estratégia de percentual de geração eólica para a produção de H₂. A energia anual gerada (EAG) nos eletrolisadores é calculada da mesma forma que a energia elétrica demonstrada na equação 1, onde é feito o somatório da multiplicação da frequência do vento com a potência dos eletrolisadores para cada velocidade. Por exemplo para o cenário 25%.22MW, entre 0m/s e 3,5m/s não há potência no eletrolisador e corresponde a 3% do período anual, portanto em aproximadamente 262 horas do ano (3% multiplicado por 8760 horas) não há geração de hidrogênio. Já entre 7,5m/s e 17m/s a potência nos eletrolisadores é a nominal de 22 MW e corresponde 77% do período anual (aproximadamente 6745 horas), gerando cerca de 148.394 MWh para produção de hidrogênio. Para as velocidades entre 4 m/s e 7 m/s a potência no eletrolisador permanece em valor intermediário à nominal, entre 3 MW e 20 MW, sendo necessário multiplicar a potência pela sua respectiva frequência do vento e por 8760h para o cálculo da contribuição de cada linha no EAG do eletrolisador.

Tabela 3 - Distribuição de frequência do vento em base anual e potência disponibilizada para geração de H₂ nos casos 25% e 50% de preferência na produção.

v [m/s]	Frequência velocidade	Potência eólica [MW]	Potência no eletrolisador					
			25%.22MW	25%.44MW	25%.66MW	50%.22MW	50%.44MW	50%.66MW
0,0	1%	0	0	0	0	0	0	0
3,0	1%	3	0	0	0	0	0	0
3,5	1%	6	0	0	0	3	3	3
4,0	1%	12	3	3	3	6	6	6
4,5	2%	19	5	5	5	9	9	9
5,0	2%	27	7	7	7	14	14	14
5,5	3%	38	9	9	9	19	19	19
6,0	3%	50	13	13	13	22	25	25
6,5	4%	65	16	16	16	22	32	32
7,0	5%	82	20	20	20	22	41	41
7,5	5%	101	22	25	25	22	44	51
8,0	6%	123	22	31	31	22	44	61
8,5	6%	147	22	37	37	22	44	66
9,0	7%	171	22	43	43	22	44	66
9,5	7%	195	22	44	49	22	44	66
10,0	7%	216	22	44	54	22	44	66
10,5	7%	232	22	44	58	22	44	66
11,0	6%	245	22	44	61	22	44	66
11,5	6%	253	22	44	63	22	44	66
12,0	5%	258	22	44	64	22	44	66
12,5	4%	260	22	44	65	22	44	66
13,0	3%	262	22	44	65	22	44	66
13,5	3%	263	22	44	66	22	44	66
14,0	2%	263	22	44	66	22	44	66
14,5	1%	263	22	44	66	22	44	66
15,0	1%	263	22	44	66	22	44	66
15,5	1%	263	22	44	66	22	44	66
16,0	0%	264	22	44	66	22	44	66
16,5	0%	264	22	44	66	22	44	66
17,0	0%	264	22	44	66	22	44	66

Os cenários apresentados resultam em distintos valores de geração elétrica disponibilizada à rede, não só porque produzem diferentes volumes de hidrogênio, mas também por causarem impactos distintos nos cortes de geração. Portanto a geração disponibilizada à rede é calculada conforme a equação 2.

$$\text{Geração para rede} = \text{Geração eólica potencial} - \text{Geração nos eletrolisadores} - \text{Curtailment} \quad (2)$$

A geração eólica potencial é fixa em 1.521.605MWh e a geração nos eletrolisadores foi descrita anteriormente. Já o *curtailment* pode ser determinado com base nas curvas de potência apresentadas por Pinho (2017), descontando a potência instalada de eletrolisadores. A Tabela 4 mostra um exemplo para outubro com 22MW de potência de eletrolisador (cenários EXCE.22MW, 25%.22MW e 50%.22MW), entre 01:00 e 12:00. A estratégia atribuída para a preferência na geração de H2 não interfere no resultado de *curtailment*. Essa metodologia de cálculo assume que os momentos de *curtailment* acontecem nas ocorrências de vento em que os eletrolisadores estão em carga máxima. Por exemplo, acima de 7,5m/s para 22MW (

v [m/s]	Frequência velocidade	Potência eólica [MW]	Potência no eletrolisador					
			25%.22MW	25%.44MW	25%.66MW	50%.22MW	50%.44MW	50%.66MW
0,0	1%	0	0	0	0	0	0	0
3,0	1%	3	0	0	0	0	0	0
3,5	1%	6	0	0	0	3	3	3
4,0	1%	12	3	3	3	6	6	6
4,5	2%	19	5	5	5	9	9	9
5,0	2%	27	7	7	7	14	14	14
5,5	3%	38	9	9	9	19	19	19
6,0	3%	50	13	13	13	22	25	25
6,5	4%	65	16	16	16	22	32	32
7,0	5%	82	20	20	20	22	41	41
7,5	5%	101	22	25	25	22	44	51
8,0	6%	123	22	31	31	22	44	61
8,5	6%	147	22	37	37	22	44	66
9,0	7%	171	22	43	43	22	44	66
9,5	7%	195	22	44	49	22	44	66
10,0	7%	216	22	44	54	22	44	66
10,5	7%	232	22	44	58	22	44	66
11,0	6%	245	22	44	61	22	44	66
11,5	6%	253	22	44	63	22	44	66
12,0	5%	258	22	44	64	22	44	66
12,5	4%	260	22	44	65	22	44	66
13,0	3%	262	22	44	65	22	44	66
13,5	3%	263	22	44	66	22	44	66
14,0	2%	263	22	44	66	22	44	66
14,5	1%	263	22	44	66	22	44	66
15,0	1%	263	22	44	66	22	44	66
15,5	1%	263	22	44	66	22	44	66
16,0	0%	264	22	44	66	22	44	66
16,5	0%	264	22	44	66	22	44	66
17,0	0%	264	22	44	66	22	44	66

).

Tabela 4 – Redução nos excedentes eólicos para planta de H2 de 22 MW (outubro).

	<i>Curtailment</i>	Potência H2	<i>Curtailment</i>
01:00	78	22	56
02:00	78	22	56
03:00	78	22	56
04:00	78	22	56
05:00	78	22	56

06:00	74	22	52
07:00	71	22	49
08:00	68	22	46
09:00	52	22	30
10:00	26	22	4
11:00	4	4	0
12:00	0	0	0

O resultado dos excedentes em termos de energia é apresentado na Tabela 5 para as três potências de eletrolisadores. Os percentuais são calculados em comparação ao potencial de geração eólica descrito anteriormente, no valor de 1.521.605 MWh. Esses valores foram usados na equação 2 para o cálculo da energia disponibilizada à rede.

Tabela 5 - Corte de geração eólica para diferentes potências instaladas de eletrolisadores.

Potência eletrolisadores	Corte
0 MW	161.290 MWh (10,6%)
22MW	91.296 MWh (6,0%)
44MW	41.083 MWh (2,7%)
66MW	10.651 MWh (0,7%)

Iniciando a análise de aspectos econômicos, foi considerado um cenário de comercialização em 50% no Ambiente de Contratação Regulado (ACR) e 50% no Ambiente de Contratação Livre (ACL) na venda da energia elétrica gerada em um horizonte de 32 anos, visto que contratos de longo prazo no mercado livre para fontes renováveis são uma tendência e vem aparecendo com frequência para viabilização de empreendimentos. O valor negociado no ACR foi definido com base no último leilão (nº 8/2021), em R\$160,36/MWh no A-5 para energia eólica. Para o ALC foram utilizados valores obtidos por uma comercializadora de energia consultada, com valores entre 231 e 144 R\$/m3 ao longo dos anos, dados obtidos em 2022.

A estrutura de custo da usina pode ser dividida em investimento (CAPEX) e custos de operação (O&M). Com base em IRENA (2020), estima-se o valor de implementação do complexo eólico em US\$1.449 por kW instalado (R\$6.520 para cotação de R\$5/US\$). Para potência instalada do parque de 310MW, o valor total do custo de implementação é de R\$2.021.355.000. Também foi considerado capital de giro equivalente aos custos fixos administrativos para 2 anos de operação, no valor de R\$7,3 milhões. Para os custos de operação e tarifas utilizou-se como referência o mesmo relatório da IRENA (2020), Custódio (2013) e dados do setor elétrico. A

Tabela 6 apresenta separadamente as despesas que variam conforme a receita da usina e os custos que são função da potência instalada.

Tabela 6 – Despesas gerais e custo de O&M na geração eólica

Despesas eólicas com base no faturamento.		O&M com base na potência instalada		
		Un (por MW)	Total	
Arrendamento terreno	1,50%			
Seguros (civil e operacional)	0,70%			
Taxa ONS/CCEE	0,07%			
TFSEE (ANEEL)	0,40%			
TUST	5,00%			
Total	7,67%			
		Administrativo	R\$ 10.400	R\$ 3.224.000
		O&M	R\$ 12.682	R\$ 3.931.600
		O&M Eólico		
		Ano 1	R\$ 6.300	R\$ 1.953.000
		Ano 2	R\$ 8.700	R\$ 2.697.000
		Ano 3	R\$ 23.800	R\$ 7.378.000
		Ano 4	R\$ 64.000	R\$ 19.840.000
		Ano 5 ao 9	R\$ 70.000	R\$ 21.700.000
		Ano 10 ao 14	R\$ 77.000	R\$ 23.870.000
		Ano 11 ao 15	R\$ 84.700	R\$ 26.257.000
		Ano 16 ao 20	R\$ 93.170	R\$ 28.882.700
		Ano 21 ao 25	R\$ 102.487	R\$ 31.770.970
		Ano 26 ao 30	R\$ 112.736	R\$ 34.948.067
		Ano 30 ao 32	R\$ 124.009	R\$ 38.442.874

Adicionalmente aos custos apresentados, há ainda o imposto de renda (IR) e a contribuição social sobre o lucro líquido (CSLL), respectivamente nos valores de 15% e 9% sobre o lucro tributável, e a depreciação, considerada em 25 anos para os equipamentos. Além disso foi adicionado o custo de reinvestimento no parque para os últimos 10 anos de operação, no valor de 10% do investimento inicial dos aerogeradores. Na estrutura de capital, considerou-se o financiamento de 70% do investimento de implementação, com taxa de 7% e horizonte de 20 anos. A utilização dos recursos foi efetuada em quantidades iguais nos 3 primeiros anos do horizonte dos 35 anos analisados, sendo 3 de implementação e 32 de operação. Para análise de VPL, o custo de capital foi 12%, valor compatível em comparação às taxas de financiamento de longo prazo no País entre 2010 e 2022. Para correção monetária das receitas com energia elétrica e hidrogênio foi considerado IPCA de 5%, também compatível com o histórico do País entre 2010 e 2022.

Com base nos parâmetros descritos, foi calculada a taxa interna de retorno (TIR) de 15,45% para planta puramente eólica, onde a geração é totalmente direcionada para o SIN e não há planta de hidrogênio verde para atenuar os cortes na produção.

Segundo IEA (2019) e EPE (2021), o custo de CAPEX da planta de hidrogênio deve ficar na faixa de €500/kW a €2000/kW (US\$ 555/kW a US\$ 2222/kW) no horizonte de curto a longo prazo, incluindo o conjunto eletrolisadores e infraestrutura auxiliar, sendo que na atualidade o custo está mais próximo do limite superior de €2000/kW (US\$ 2222/kW). Custos de operação e manutenção são fornecidos com base em percentual do investimento de implementação (CAPEX), utilizado o valor anual de 2% mais 15% nos anos 12 e 24, referente a troca das pilhas de eletrólise (*stacks*).

Para cada aplicação de hidrogênio, exige-se logística e volumes de armazenagem específicos, que alteram sensivelmente o custo do hidrogênio resultante. O estudo não restringe um tipo de aplicação, mas sim o simples fornecimento de H₂ nas proximidades da planta de produção. Portanto utilizou-se o valor genérico de armazenagem equivalente a dois dias de produção em capacidade máxima. Com o objetivo de explorar o impacto do volume armazenado, um dos cenários foi selecionado para ampliação para 10 dias de armazenagem. No custo do investimento em armazenagem utilizou-se o valor apresentado por Dinh (2021), em €170 /kg (US\$189/kg).

Os resultados do custo de produção do hidrogênio na planta híbrida são apresentados no capítulo posterior de forma a resultar na mesma TIR do caso puramente eólico. A Tabela 7 resume os dados apresentados neste capítulo juntamente com a TIR que será usada como referência.

Tabela 7 - Resumo dos parâmetros para cálculo do retorno financeiro

Potência instalada eólica	310 MW
----------------------------------	---------------

Potencial de geração eólica	1.521.605 MWh
Fator de capacidade eólico	56%
Potência instalada planta hidrogênio	22 MW, 44 MW, 66 MW
Consumo energético eletrolisador	50 kW/kgH2
Consumo energético periféricos H2	3 kW/kgH2
Média ponderada preço eletricidade	R\$ 147,27
CAPEX eólico total	R\$ 2.021.355.000
CAPEX planta hidrogênio unitário	US\$555 - US\$2.222/kW
OPEX planta de hidrogênio	2% do CAPEX anualmente 15% do CAPEX a cada nos anos 12 e 24
CAPEX armazenamento hidrogênio unitário	US\$189/kgH2
Horizonte de análise	35 anos
Percentual financiamento	70%
Taxa financiamento	7%
IPCA	5%
TIR	15,45%
VPL	R\$ 256.511.382

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nos parâmetros atuais de investimento e manutenção em energia eólica e nos preços de negociação de energia elétrica, calculou-se a taxa interna de retorno (TIR) de 15,45% para um projeto puramente eólico. A partir desse valor buscou-se o preço do hidrogênio resultante para que a TIR fosse mantida a mesma. A Tabela 8 apresenta a energia disponibilizada à rede elétrica e a quantidade de hidrogênio gerada em termos anuais, onde o impacto do porte dos eletrolisadores no *curtailment* pode ser notado.

Tabela 8 – Geração elétrica para rede e produção de hidrogênio

Cenário	Energia rede (MWh)	Energia eletrolisadores (MWh)	Geração hidrogênio (kg)	Curtilment (MWh)
EXCE.22MW	1.360.669	69.108	1.304	91.296
EXCE.44MW	1.360.669	119.901	2.262	41.083
EXCE.66MW	1.360.669	150.049	2.831	10.651
25%.22MW	1.256.551	173.225	3.268	91.296
25%.44MW	1.176.664	303.906	5.734	41.083
25%.66MW	1.130.464	380.253	7.175	10.651
50%.22MW	1.246.371	183.405	3.460	91.296
50%.44MW	1.133.898	346.672	6.541	41.083
50%.66MW	1.022.567	488.150	9.210	10.651

Naturalmente, o preço do hidrogênio é altamente impactado pelo investimento na planta de eletrolisadores, portanto o resultado será analisado com base nesse fator. Os cenários foram descritos anteriormente na

Tabela 2 e são apresentados nos gráficos a seguir.

Figura 4 – Custo de H2 – Comparação dos cenários de 22MW

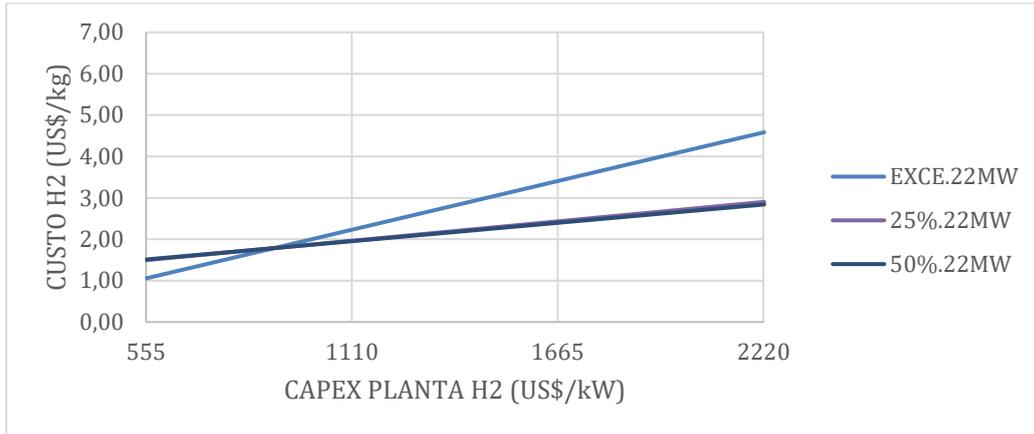


Figura 5 – Custo de H2 – Comparação dos cenários de 44MW

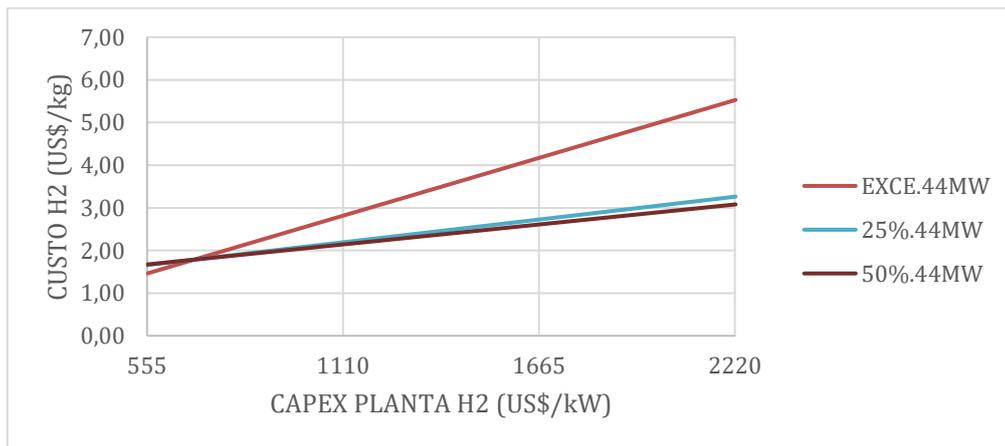
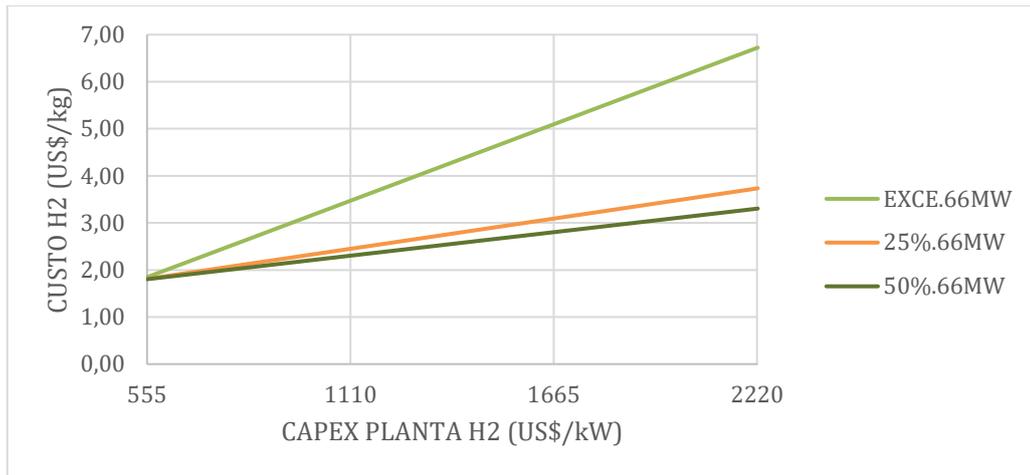


Figura 6 – Custo de H2 – Comparação dos cenários de 66MW

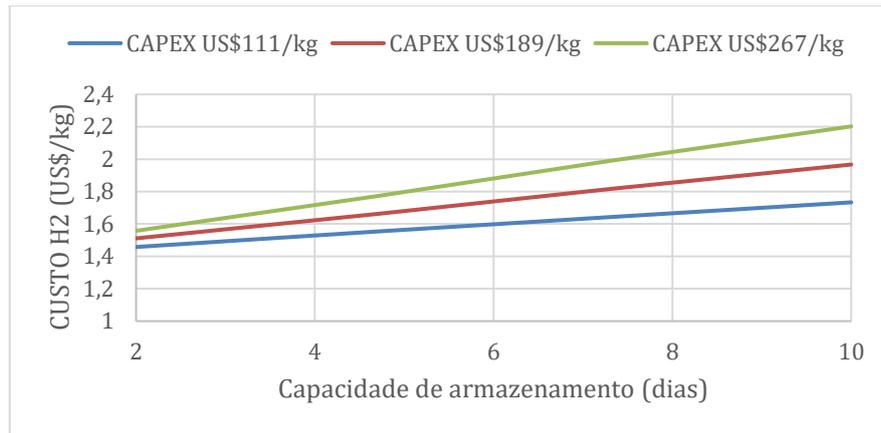


Inicialmente destaca-se a linearidade entre o custo do hidrogênio e o CAPEX dos eletrolisadores, divergindo a inclinação da reta entre os cenários. Em relação ao porte da planta de eletrolisadores, nota-se sempre o aumento no custo do hidrogênio ao ampliar a potência instalada. Entretanto fica claro que o aumento na preferência da produção de hidrogênio atenua esse efeito, tornando as curvas dos cenários de 50% mais próximas em comparação aos cenários de 25% e, principalmente, aos de excedente. O fato está associado ao fator de capacidade da planta, maiores para os cenários de 50%, mostrando que o seu aumento ocasiona menor custo de produção, conforme apresentado por IEA (2020).

Outro ponto de destaque é a inclinação das retas, que indica a sensibilidade no custo do hidrogênio de acordo com aumento no custo de investimento. Nos casos de somente excedentes, onde há menor fator de capacidade dos eletrolisadores, os maiores investimentos são pouco recompensados pelo volume de hidrogênio e, portanto, mais sensíveis ao CAPEX. Para as potências instaladas de 22MW e 44MW há um ponto de intersecção, onde geração a partir exclusivamente de excedentes se torna mais vantajosa em comparação às opções 25% e 50% nos patamares inferiores de CAPEX. Em relação à comparação de 25% com 50%, há um domínio da segunda opção, se mantendo mais vantajosa em termos de custo de hidrogênio em todos os casos, apesar da proximidade das retas.

Nos casos até aqui apresentados foram considerados 2 dias de plena produção de capacidade de armazenagem. Para análise de impacto da capacidade de armazenagem, selecionou-se o cenário de potência instalada de 22MW e 50% na preferência de produção (50%.22MW), elevando a capacidade de armazenagem de 2 até 10 dias, resultante em 60 toneladas até 300 toneladas. O gráfico também mostra o efeito do custo da armazenagem, avaliando para US\$100/kg, US\$189/kg e US\$267/kg. Novamente o custo do hidrogênio apresentado é o resultante para que a TIR se mantenha em 15,45% do caso referência de usina puramente de energia eólica para rede.

Figura 7 – Custo de H2 de acordo com o porte do Sistema de armazenagem



O impacto no custo do hidrogênio fica claro com o aumento no CAPEX de armazenagem, intensificado quando são considerados mais dias de armazenagem. Entre o maior (10 dias com US\$267/kg) e o menor (2 dias US\$100/kg) caso, verifica-se um aumento de US\$1,45/kg para US\$2,20/kg no custo do hidrogênio, de pouco mais de 50%. Ao se comparar 2 dias com 10 dias para US\$189/kg, considerado o custo padrão no trabalho, o aumento é de 30%, passando de US\$1,51/kg para US\$1,97/kg.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados possuem coerência em comparação aos números identificados nas referências. Por exemplo na nota técnica Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira de Hidrogênio (EPE, 2021) é apresentada a faixa de US\$3/kg e US\$7,5/kg, valor alinhado a faixa entre US\$2,84/kg e US\$6,72/kg que foi calculada no trabalho para o limite superior de CAPEX (US\$2222/kW), considerado mais próximo da realidade atual. Foram utilizados valores de 2021 e 2022 de energia elétrica, ponderado por parcelas iguais de comercialização no ACL e ACR, alterações no cenário de energia elétrica vão impactar os resultados, uma vez que a energia eólica gerada está competindo entre comercialização no SIN e geração de hidrogênio. Em resumo, um cenário onde a energia elétrica esteja mais cara resulta em uma TIR puramente eólica mais elevada, forçando para cima o custo do hidrogênio para que a receita e a TIR sejam preservadas.

Para a realidade atual de elevado CAPEX das plantas de geração de hidrogênio, as estratégias de produção que se destacam são as de maior fator de capacidade, já que o elevado custo exige maior retorno financeiro do volume de hidrogênio comercializado. A estratégia de buscar maior fator de capacidade ainda possui o benefício de atenuar o incremento do custo de H₂ ao ampliar a capacidade da planta. IEA (2020) apresenta o fator de capacidade como parâmetro determinante ao comparar o custo nivelado de hidrogênio em diferentes níveis de CAPEX, portanto o sistema se torna mais sensível ao custo de investimento à medida que se aumenta a ociosidade. Com isso, a disponibilidade de eletricidade a baixo custo associada a operação predominante dos eletrolisadores em elevadas horas de plena carga é, juntamente com a redução no CAPEX, essencial para a produção de hidrogênio verde de baixo custo.

Por outro lado, a estratégia de gerar hidrogênio exclusivamente para aproveitamento de excedentes eólicos mostra-se pouco competitiva para os custos atuais de CAPEX, havendo necessidade de grandes quedas nos mesmos para tornar-se atrativa. Vale ressaltar que os eletrolisadores PEM são responsáveis por aproximadamente 60% do custo de CAPEX em uma planta completa de geração de hidrogênio. O restante da infraestrutura, responsável por 40% do CAPEX, é composta por tecnologias mais maduras e menos passíveis de redução drástica de custo. É necessário considerar esse fator atenuante ao avaliar a capacidade potencial de redução no custo nivelado de hidrogênio.

Dado os elevados custos de armazenagem do hidrogênio e a dificuldade de transporte devido à sua baixa densidade, deve-se selecionar locais em que dois requisitos sejam atendidos: fácil destinação do hidrogênio e dificuldade de expansão em transmissão elétrica. Já foi destacada a flexibilidade de aplicação do hidrogênio, englobando produção de amônia como um vetor de transporte do hidrogênio verde, reeletrificação, ou *power-to-power*, para o Sistema Interligado Nacional (SIN), mistura com gás natural e utilização direta para mobilidade. Com o resultado obtido, cabe o complemento que a flexibilidade se estende ao tamanho da planta, de médio porte no presente estudo, visto que os equipamentos são modulares e que nos patamares de preços de energia de 2021 e 2022 já se obteve preços de hidrogênio verde atrativos.

A utilização de hidrogênio vem constantemente sendo apresentada como pilar central na descarbonização de médio a longo prazo. Alternativas que iniciem a sua utilização de larga escala mantendo a rentabilidade dos projetos em energia elétrica são importantes para o posicionamento do Brasil em um mercado com elevada penetração global, alinhando ações com as diretrizes do Programa Nacional do Hidrogênio. A exemplo do que aconteceu na energia eólica, programas de incentivo público são fundamentais para que as cadeias de produção sejam estabelecidas. Com isso os custos de investimento tendem a cair e o hidrogênio se tornar mais competitivo, criando um ciclo na direção de maturidade de cadeias de suprimento e mercado.

REFERÊNCIAS

BALAT, M. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. **International Journal of Hydrogen Energy**, Trabzon, v. 33, n. 15, p. 4013-4029, 2008.

BERTUCCIOLI, L., CHAN, A., HART, D., & al, e. (2014). Development of Water Electrolysis in the European Union. Disponível em: <<https://www.fch.europa.eu/page/who-we-are>> Acesso em: 16 jun. 2022.

CUSTÓDIO, R. Energia eólica Para Produção de Energia Elétrica 2 ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2013.

DINH, V. N., LEAHY, P., et al. Development of a viability assessment model for hydrogen production from dedicated offshore wind farms. **International Journal of Hydrogen Energy**, Cork, v. 46, n. 48, p. 24620-24631, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Bases para consolidação da Estratégia Brasileira de Hidrogênio. Rio de Janeiro, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Decenal de Expansão de Energia 2031. Rio de Janeiro, 2022.

GLENK, G., REICHELSTEIN, S. Economics of converting renewable power to hydrogen. **Nat Energy**, v. 4, p.216-222, 2019.

HARRISON, K. (s.d.). Wind-to-Hydrogen Project. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/hydrogen/wind-to-hydrogen.html>> Acesso em: 16 jun. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). The future of Hydrogen. Paris, 2019.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Renewable Energy Statistics 2020. Abu Dhabi, 2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Power Generation Costs 2020. Abu Dhabi, 2021.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Programa Nacional do Hidrogênio, 2021.

MORAIS, Rafael Cancellia. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Análise do impacto da expansão de novas renováveis variáveis no custo de geração de energia elétrica no Brasil, 2021.

MAGALHÃES, Rafael de Moraes. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Escola Politécnica. Produção de hidrogênio renovável via eletrólise a partir de excedentes de energia eólica, 2021.

PINHO, Lucas. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Avaliação da Produção de Hidrogênio a Partir de Excedentes de Energia Eólica Utilizando Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos, 2017.

ROBINIUS, M. et al. Comparative analysis of infrastructures: Hydrogen fueling and electricity charging of vehicles. **Energy and Environment**, v. 408, 2018.

URSUA, A., GANDIA, L. M., & SANCHIS, P. Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 2, p. 410-426, 2012.

Desenvolvimento de nova solução de transporte de pá eólica – estudo de caso: pá invertida – Terminal Enseada

André Linhares,² Cauan Assis,¹ Cleydson Carvalho,¹ Daniel Batista,¹ Danilo Oliveira,¹ Elenaldo Braga,¹ Jacques Raigorodsky,¹ Jonston Caldeira,¹ Mário Lincoln,² Mário Moura,¹ Matheus Schiochet,³ Miguel Fracchia,² Nayele Braga,² Pedro Augusto,² Roberto Souza¹ e Wilson Ozawa².

1 Enseada Indústria Naval – www.enseada.com – danilo.oliveira@enseada.com

2 Transpés – www.transpes.com.br – wilson.ozawa@transpes.com.br

3 CGN Brazil Energy – www.cgnbe.com.br – matheus.schiochet@cgnbe.com.br

RESUMO

A energia eólica é mundialmente uma das principais fontes renováveis. O Brasil é o sexto em capacidade instalada (*onshore*) com 25,6 GW, e terceiro nos últimos 12 meses. Nesse cenário, os componentes são maiores e pesados, aumentando a complexidade logística. Este trabalho apresenta um estudo de caso, cujo ponto de partida foi a inviabilidade de manobra de pás no Cais do Terminal Enseada. As alternativas foram avaliadas, resultando na inovação nomeada “pá invertida”. Sendo a manobra viável, o Terminal Enseada realizou, com a Transpés, a movimentação de 120 pás eólicas importando 40 aerogeradores em cinco navios para a CGN Brazil Energy.

Palavras-chave: Pá invertida; Pá eólica; Transporte; Manobra; Enseada.

ABSTRACT

Wind energy is one of the world's leading renewable sources. Brazil is 6th in installed capacity (onshore) with 25.6 GW and 3rd in the last 12 months. In this scenario, the components are larger and heavy, increasing logistical complexity. This paper presents a case study, whose starting point was the infeasibility of wind blade maneuvering at the Enseada Terminal Pier. The alternatives were evaluated, resulting in the innovation called "inverted wind blade". The maneuver being feasible, the Enseada Terminal carried out, with Transpés, the operation of 120 wind blades importing 40 wind turbines in five ships for CGN Brazil Energy.

Keywords: inverted wind blade; wind blade; transportation; manoeuvre; Enseada.

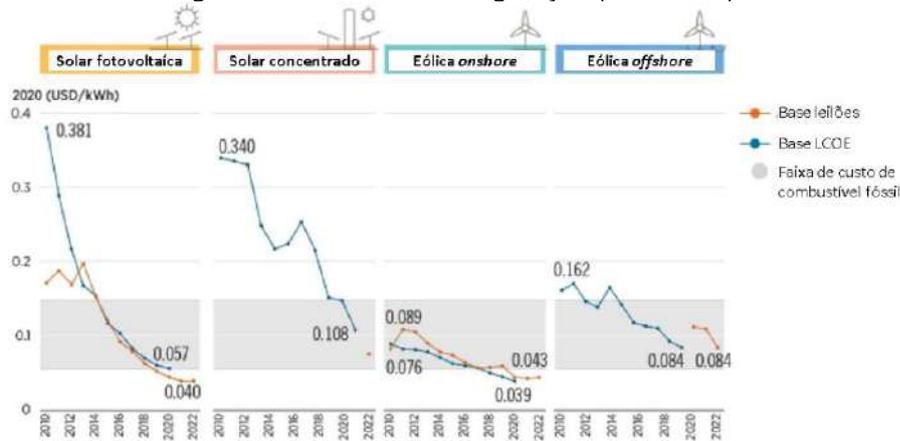
1. INTRODUÇÃO

O mercado global de energia está em contante transição entre as diferentes fontes de geração. Cada região possui matrizes energéticas baseadas nas condições locais, ambientais, relevo, econômicas, demanda, capacidade distribuição entre outros.

O cenário ambiental mundial tem impulsionado a transição energética para as energias renováveis. A Conferência das Partes (COP) desempenha um papel importante reunindo líderes para discutir e definir metas sobre a situação climática mundial. Em suas últimas edições, COP 26 e COP 27, reforçou-se a meta de neutralidade de carbono até 2050 (net zero) para limitar o aquecimento global.

Nesse direcionamento, mundialmente, a energia eólica onshore e solar fotovoltaica se destacam pela redução do custo LCOE (Custo nivelado de Energia do inglês Levelized Cost of Energy) de geração conforme Figura 1.

Figura 1 – Custo médio de geração (US\$/MWh)

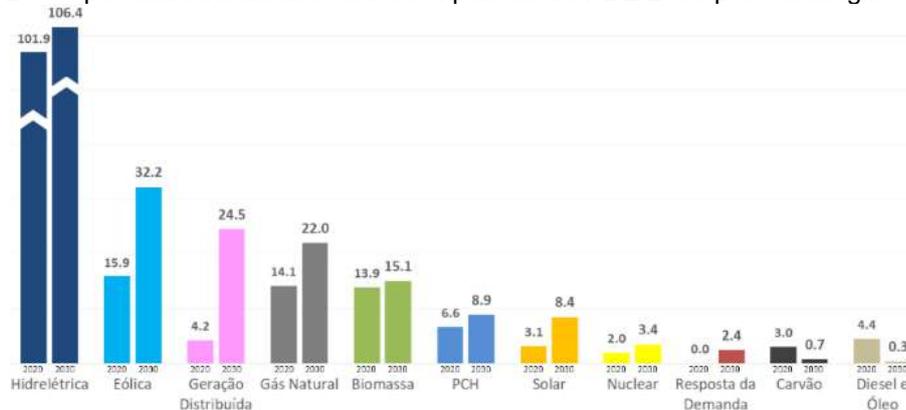


Fonte: International Renewable Energy Agency (IRENA) (2022, tradução nossa).

International Renewable Energy Agency (2022) associa a redução do LCOE à melhoria da tecnologia das turbinas eólicas, resultando em maior capacidade de geração e menor custo por capacidade instalada (US\$/MW). Isso tem levado ao aumento das dimensões e pesos dos componentes (BOŠNJAKOVIĆ *et al.*, 2022).

No Brasil, até o final de dezembro de 2022, a capacidade instalada de energia eólica *onshore* foi de 25,6 GW (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS, 2022). O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2030 (2021) estima que a geração eólica irá duplicar em relação a 2020, conforme Figura 2.

Figura 2 – Capacidade instalada inicial vs expansão do PDE 2030 por tecnologia – em GW



Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia 2030 (2021).

O Brasil ocupa a sexta posição em capacidade instalada até dezembro de 2022. No entanto, é o terceiro lugar com o aumento de capacidade instalada no último ano, adicionando 4,1 GW em apenas 12 meses, representando um crescimento de 18,85%. Isso marca o segundo recorde consecutivo de crescimento na geração de energia eólica no Brasil, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (ABEEólica). Novas tecnologias estão surgindo e se adaptando para atender a essa necessidade, como é o caso da eólica *offshore*.

No país, a Região Nordeste possui mais de 90% da capacidade instalada devido aos ventos constantes e intensos (Figura 3). Esse cenário ainda mantém uma perspectiva de crescimento em que o Terminal Enseada desempenha um papel fundamental como agente integrador, permitindo de forma

econômica e sustentável a expansão de novos parques eólicos, especialmente devido à sua posição estratégica.

Figura 3 – Geração e representatividade da fonte eólica

Região	2021		2022		% de crescimento
	Geração (TWh)	Representatividade	Geração (TWh)	Representatividade	
Sudeste	0,06	0,1%	0,06	0,1%	16%
Sul	6,20	8,7%	5,95	7,6%	-4%
Nordeste	63,20	88,7%	70,48	90,3%	12%
Norte	1,76	2,5%	1,59	2,0%	-10%
Total	71,22	100%	78,08	100%	9,6%

Fonte: Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias (2022).

O Terminal Enseada é um complexo naval, industrial e logístico-portuário com capacidade de realizar projetos de construção, reparo e manutenção naval e *offshore*, além de prover soluções logísticas e portuárias aliando qualidade, produtividade, segurança operacional dispondo de uma infraestrutura moderna e profissionais experientes e qualificados. A Enseada é uma empresa do Grupo Novonor.

A Transpés é uma empresa líder no setor de transportes especiais, oferecendo soluções logísticas sob medida para as necessidades desafiadoras. Possui uma vasta experiência e uma equipe qualificada, destaca-se na *expertise* em transportar cargas de grandes dimensões e pesos elevados. A empresa dispõe de uma frota moderna e equipamentos especializados, garantindo segurança e eficiência.

Em conjunto, a Enseada e a Transpés, desafiaram-se para desenvolver uma solução para a realização da manobra de pás eólicas no Cais 1 do Terminal Enseada.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

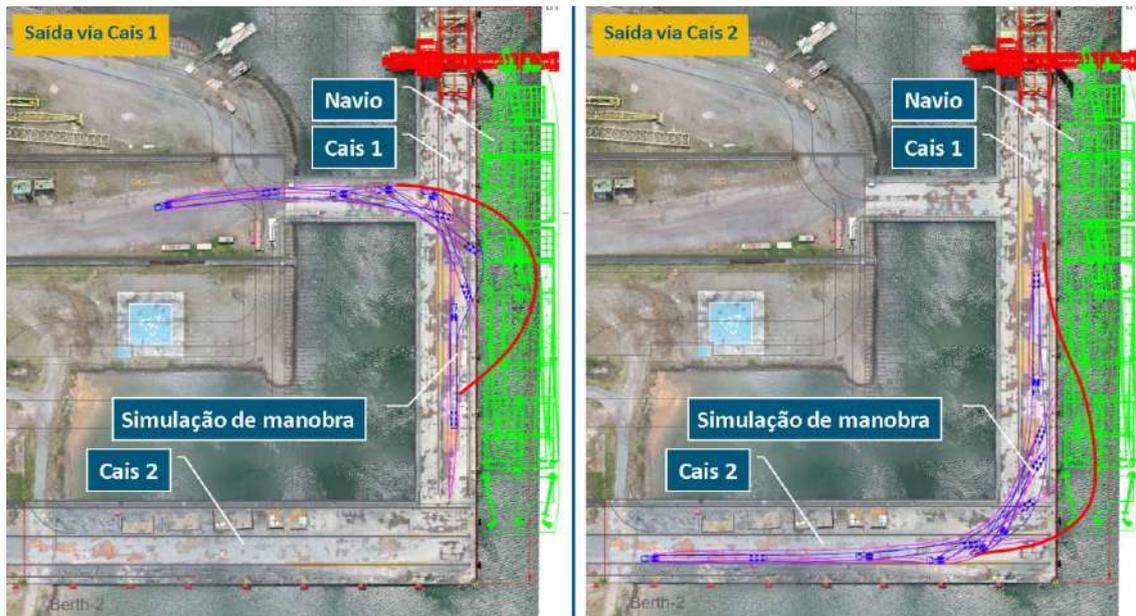
Diante de um cenário real, a CGN Brazil Energy, contactou o Terminal Enseada para a importação de 40 aerogeradores em suas infraestruturas portuárias. A logística interna (no terminal) e externa (rodoviária) dos componentes foi designada à Transpés.

A operação consiste no desembarque dos componentes dos aerogeradores – tramos, *hub*, gerador, *nacelle*, pá e outros acessórios – do navio, transporte interno, armazenamento e expedição com destino ao parque eólico. Essa operação foi modelada para cinco navios, sendo oito aerogeradores desmontados por navio.

A pá eólica é um componente desafiador de se transportar dada a sua natureza extensa e delicada, exigindo cuidados especiais de logística. O produto mede 76m de comprimento, pesa 22t e é fabricado em materiais compósitos (fibra de vidro).

A problemática foi inicialmente identificada nas primeiras simulações virtuais que analisavam a manobra (curva) de saída pá eólica do berço de atracação (Cais 1) em direção à área de armazenamento do Terminal Enseada, conforme Figura 4.

Figura 4 – Simulação de manobra da pá eólica



Fonte: Enseada/Transpés (2023).

Observa-se que a varredura da pá eólica (em vermelho na Figura 4) provoca uma interferência com o navio (em verde) para ambas as alternativas de saída do cais. Pelo fato, tal problemática tornou-se crítica para a viabilidade do projeto.

Dada a relevância do projeto e do desafio, a Enseada iniciou uma série ordenada de estudos em conjunto com a Transpés para validação final do Cliente CGN Brazil Energy no objetivo de desenvolver uma solução para a realização da manobra.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A bases de dados científicos e referências de mercado foram pesquisadas para extrair experiências técnicas e possíveis soluções.

Na base científica SCOPUS® Elsevier B.V.¹ foram pesquisadas as palavras-chave e resultados a seguir: i) “wind blade transportation” – 184 resultados; ii) “wind blade transporter” – 2 resultados; iii) “wind blade logistic” – 58 resultados; e iv) “wind blade truck” – 57 resultados.

Resultou-se em 301 publicações, sendo a maioria dos últimos dez anos.

As referências científicas apresentaram otimizações do transporte convencional como otimização do sistema de direção dos veículos especiais (ZHAO *et al.*, 2011) e otimização do conforto em carretas extensivas (JIANG *et al.*, 2011).

Além da base científica foram utilizados relatórios técnicos das principais autoridades sobre o tema no Brasil, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), e no mundo, International Renewable Energy Agency (Irena) (2022).

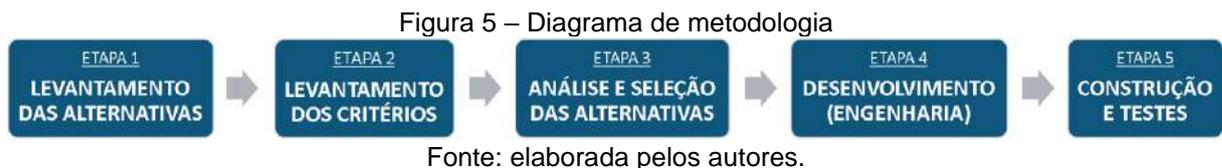
Fabricantes de equipamentos, empresas especializadas em transportes e outras referências do setor foram consultadas como referência (SHELTON, 2019).

¹ Ver em: <https://www.scopus.com/>.

4. METODOLOGIA

A pesquisa elaborada possui características exploratórias e descritivas pelo levantamento de referências bibliográficas e documentais, relacionando-as à aplicabilidade como solução da problemática.

Este estudo caracteriza-se como pesquisa aplicada, com a finalidade de levantar as alternativas, avaliá-las, selecionar a melhor, desenvolver, construir e testar conforme ilustrado na Figura 5.



Também são descritas as etapas a seguir:

- I. **Etapa 1** – Levantamento das alternativas – ideação por meio de bibliografias, documentos, reuniões técnicas e *brainstorming*;
- II. **Etapa 2** – Levantamento dos critérios – definir critérios de avaliação como métrica comparativa;
- III. **Etapa 3** – Análise e seleção das alternativas – análise dos critérios de cada alternativa e seleção da melhor alternativa;
- IV. **Etapa 4** – Desenvolvimento da solução (Engenharia) – estudos técnicos de engenharia, simulações e testes;
- V. **Etapa 5** – Construção e testes – construção e testes da solução.

5. ESTUDO DE CASO

O presente estudo de caso se concentra no desafio de desenvolver a melhor alternativa técnica e econômica para viabilidade da manobra da pá eólica no Terminal Enseada. De maneira estruturada, este capítulo apresenta os detalhes específicos de cada etapa de desenvolvimento da solução.

5.1. Etapa 1 – Levantamento das alternativas

O estudo de caso levantou alternativas para realizar a manobra (curva) de saída do Cais 1. As alternativas foram inicialmente apresentadas sem ordenação ou classificação dos critérios para não limitar o desenvolvimento de novas soluções.

- Alternativa 1 – Carreta extensiva (ex.: Faymonville) – Transporte convencional (Figura 6)

Figura 6 – Carreta extensiva (ex.: Faymonville) – Transporte convencional



Fonte: Enseada (2022).

- Alternativa 2 – Carreta + SPT com rótula (*dolly*) (Figura 7)

Figura 7 – Carreta + SPT com rótula (*dolly*)Fonte: LM Group (2016).²

- Alternativa 3 – 1 Guindaste LR1400

Figura 8 – Guindaste LR1400



Fonte: Enseada (2017).

- Alternativa 4 – 2 Guindastes LR1750

Figura 9 – Guindaste LR1750



Fonte: Enseada (2014).

- Alternativa 5 – Linhas de eixo tipo Kamag/SPMT (*Self-propelled modular transporter*)

Figura 10 – Kamag (esquerda) e SPMT (direita)



Fonte: Enseada (2014, 2022).

- Alternativa 6 – *Blade Lifter*

Figura 11 – Blade lifter



Fonte: Faymonville e Goldhofer (2023).

5.2. Etapa 2 – Levantamento dos critérios

Os critérios adotados para a avaliação das alternativas foram:

- a) Critério 1 – Geometria da manobra;
- b) Critério 2 – Estabilidade do conjunto;
- c) Critério 3 – Custo total;
- d) Critério 4 – Tempo operacional;
- e) Critério 5 – Disponibilidade (tempo de mobilização).

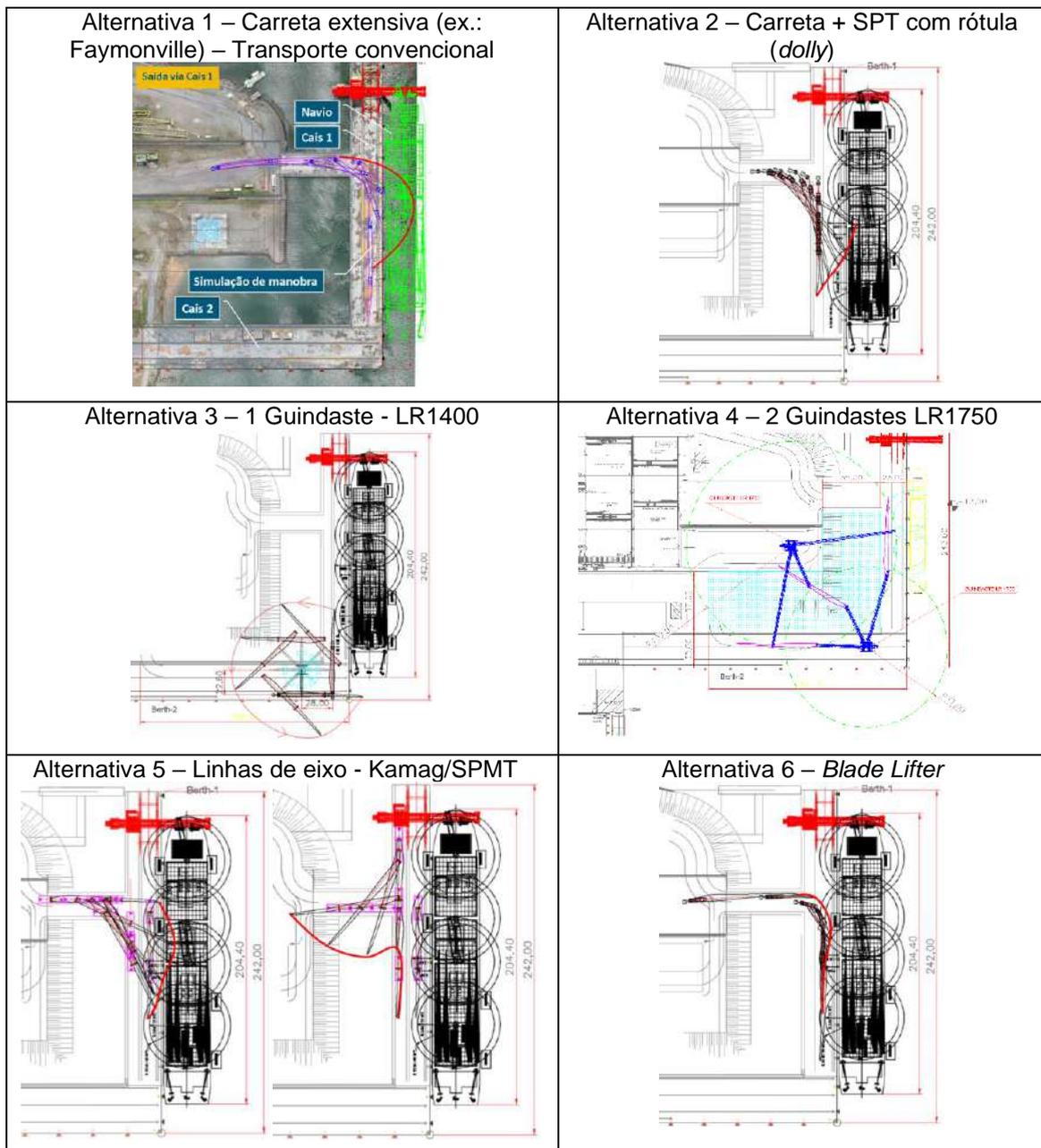
² Ver mais em: <https://www.lmwindpower.com/en/products/blade-types/longest-blade-in-the-world>.

5.3. Etapa 3 – Análise e seleção das alternativas

As alternativas foram analisadas individualmente em relação a cada critério.

Para o critério geometria, todas as opções foram simuladas utilizando o software AutoCAD® para avaliar a manobrabilidade e estimar o critério tempo operacional. Ver o quadro de simulações a seguir.

Quadro 1 – Quadro de simulações da manobra no Cais 1



Fonte: Enseada/Transpés (2022).

A análise das alternativas e critérios, estão resumidos no Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 – Análise das alternativas e critérios

ALTERN./CRITÉRIOS	1) Carreta extensiva	2) Carreta + dolly	3) 1 x LR1400	4) 2 x LR1750	5) Kamag/SPMT	6) Blade lifter
Geometria	INVIÁVEL	INVIÁVEL	VIÁVEL	VIÁVEL	VIÁVEL	VIÁVEL
Estabilidade	VIÁVEL	VIÁVEL	VIÁVEL	VIÁVEL	VIÁVEL	VIÁVEL
Custo	BAIXO	MÉDIO	ALTO	MUITO ALTO	BAIXO/MÉDIO	ALTO
Tempo Operacional	BAIXO	BAIXO	ALTO	MUITO ALTO	BAIXO	ALTO
Disponibilidade	IMEDIATA	IMEDIATA	MÉDIA	BAIXA	IMEDIATA/MÉDIA	MUITO BAIXA

Fonte: elaborado pelos autores.

A Alternativa 1 é inviável geometricamente. Uma variação sugerida pelo time foi a realização da manobra de ré, portanto teria um impacto significativo no tempo operacional e aumentaria o risco, uma vez que a manobra tornar-se-ia mais complexa.

A Alternativa 2 possui uma condição geométrica similar à Alternativa 1 devido à interferência da varredura com o navio. Como variação, foi sugerido pelo time o afastamento do berço da cauda para modificar o raio e varredura da manobra. Além de inviável pelo excessivo tempo operacional, tal alternativa não foi aceita, pois mudaria os pontos de apoio da pá eólica, sendo que não fora dimensionada para tais esforços.

As Alternativas 3 e 4, mesmo viável geometricamente, apresentaram custos elevados e tempo operacional excessivo que inviabilizariam a operação.

A Alternativa 5 é adequada ao considerar a cauda na dianteira invertendo a varredura. O terminal dispõe de dois transportadores hidráulicos (Kamag), porém, para a operação pretendida, seria necessário a mobilização de equipamentos adicionais, impactando no custo. Adicionalmente, seria necessário construir um par de rótulas e um cambão a serem instalados nos transportadores para evitar a transferência de esforços para a pá eólica durante a manobra.

A Alternativa 6 é adequada geometricamente, entretanto não está disponível no Brasil. O tempo de preparação (fabricação do flange) e mobilização (importação) dos equipamentos não eram compatíveis ao prazo do projeto. Ainda assim, a mobilização (aluguel ou compra) acrescentaria custos significativos à operação. O tempo operacional também é elevado por ser necessário parafusar o flange.

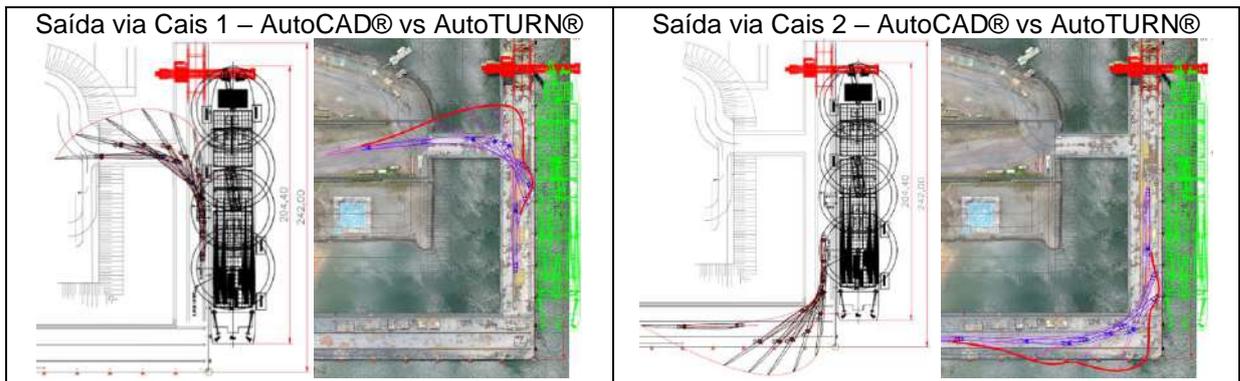
Ao observar todas alternativas, foi idealizada uma combinação da Alternativa 1 (movimento de ré) e da Alternativa 5 (inversão da varredura para a dianteira). Essa solução foi denominada transporte com a “pá invertida” sendo viável em todos os critérios de avaliação.

5.4. Etapa 4 – Desenvolvimento da solução (Engenharia)

A solução da “pá invertida” passou a ser verificada por todos os critérios da operação e critérios de Engenharia para o seu completo detalhamento.

Inicialmente, a verificação geométrica da manobra foi simulada em AutoCAD® e, posteriormente, validada pelo software AutoTURN®. Ver Figura 12.

Figura 12 – Simulação de manobra da “pá invertida”

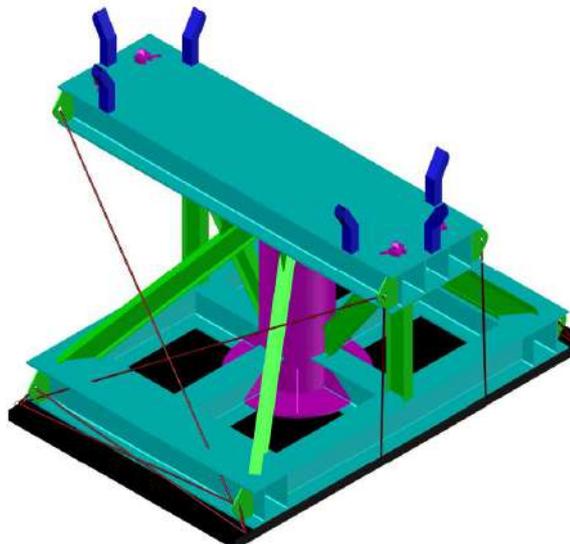


Fonte: Enseada/Transpés (2022).

Validada simulação virtual, foi mobilizada uma carreta extensiva (Faymonville) até o Terminal Enseada validando a manobra na curva em questão.

Em paralelo, iniciou-se o desenvolvimento do dispositivo a ser instalado na carreta extensiva no objetivo de inverter a pá eólica. O dispositivo robusto e estável foi dimensionado para ser utilizado em qualquer pá eólica e qualquer veículo transportador. Este fora projetado com capacidade suficiente para resistir os impactos durante o posicionamento da pá e às acelerações durante o transporte. O dispositivo é dotado de sistemas de peação (corrente e *lockers*) e guias de posicionamento.

Figura 13 – Dispositivo para “pá invertida”

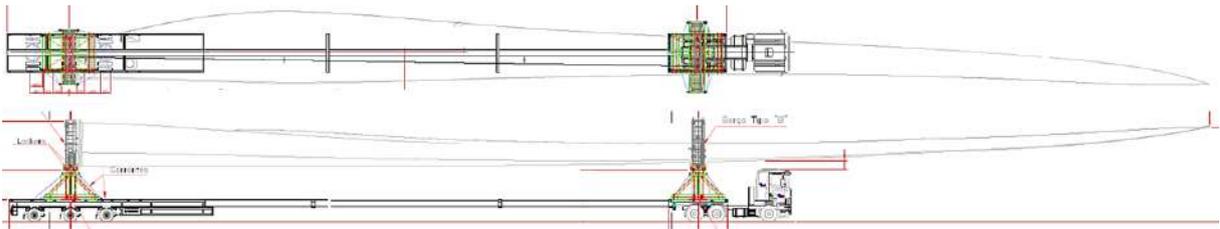


Fonte: Enseada (2022).

Durante o desenvolvimento do produto, alguns pontos foram verificados como:

Arranjo do conjunto: carreta extensiva, os dispositivos e a pá na posição invertida. Nesta fase, alinhando os Centros de Gravidade de cada elemento.

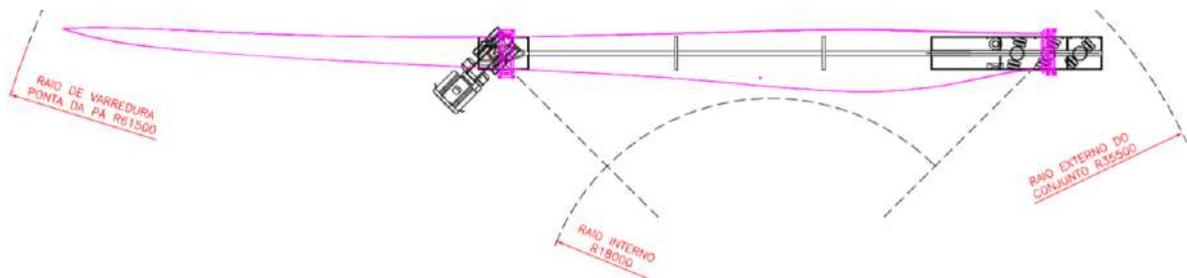
Figura 14 – Arranjo do conjunto “pá invertida” – Carreta, dispositivo e pá invertida



Fonte: Enseada (2022).

Raios de curvatura: limite operacional de 90° entre o conjunto dos eixos dianteiros e traseiros da carreta extensiva.

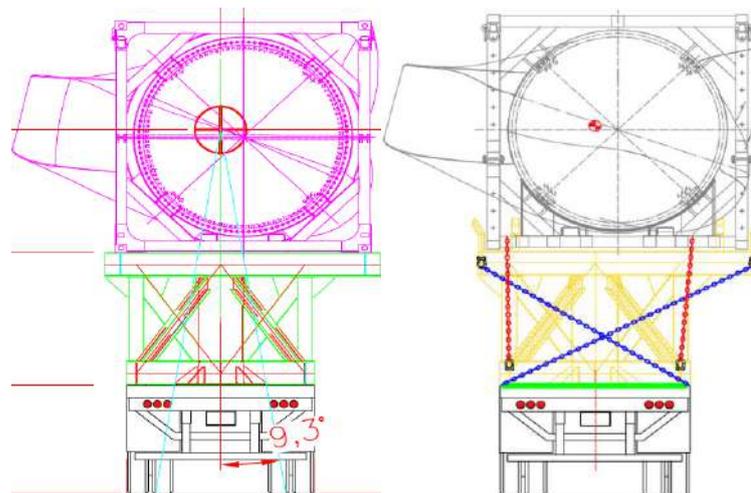
Figura 15 – Raios de curvatura



Fonte: Transpés (2022).

Estabilidade e peação: estudo de estabilidade determinando o ângulo máximo de inclinação do conjunto e o sistema de peação do conjunto com *locker* e sem *locker*.

Figura 16 – Estudo de estabilidade e sistema de peação



Fonte: Transpés (2022).

5.5. Etapa 5 – Construção e testes

Os estudos de Engenharia realizados validaram o desenvolvimento do produto. Esses estudos foram apresentados às equipes técnicas das empresas envolvidas para comentários e aprovação. Após a aprovação, iniciou-se a construção dos dispositivos na Enseada (Figura 17), que dispõe de

infraestrutura industrial e equipe capacitada. Para garantir a funcionalidade e segurança do dispositivo, foi utilizado um berço de uma pá eólica para testar a utilização dos *lockers* e das folgas das guias.

Figura 17 – Construção e teste do dispositivo da “pá invertida”



Fonte: Enseada (2022).

Foram fabricados três pares do dispositivo a serem instalados em três carretas extensivas (Faymonville).

Figura 18 – Dispositivos para “pá invertida”



Fonte: Enseada (2022).

Os principais riscos associados a essa operação eram: i) tombamento (devido ao CG); ii) raio de curvatura; iii) vento excessivo; e iv) comunicação com a estiva (equipe de bordo – guindasteiros e estivadores). Um plano de ação foi elaborado contemplando todas as tratativas necessárias para a realização da operação real incluindo o trajeto até o armazenamento.

6. APLICAÇÃO DA SOLUÇÃO (OPERAÇÃO)

Antes da chegada do primeiro navio todos os itens foram verificados. Os dispositivos foram instalados nas carretas com uma equipe de topografia da Enseada.

A operação teve início com a disponibilização de todos os recursos necessários (pessoas e equipamentos). Uma reunião entre todos os envolvidos foi importante para o alinhamento de suas responsabilidades individuais e coletivas. Em seguida, deu-se início ao desembarque. Observar o posicionamento da pá no dispositivo (Figura 19).

Figura 19 – Posicionamento da pá eólica nos dispositivos



Fonte: Enseada/Transpés (2022).

Uma vez que todo sistema estava apeado e seguro, autorizava-se o início da manobra de saída em direção ao armazenamento. Ver imagens da manobra a seguir.

Figura 20 – Imagens aéreas da manobra da “pá invertida”



Fonte: Enseada (2022).

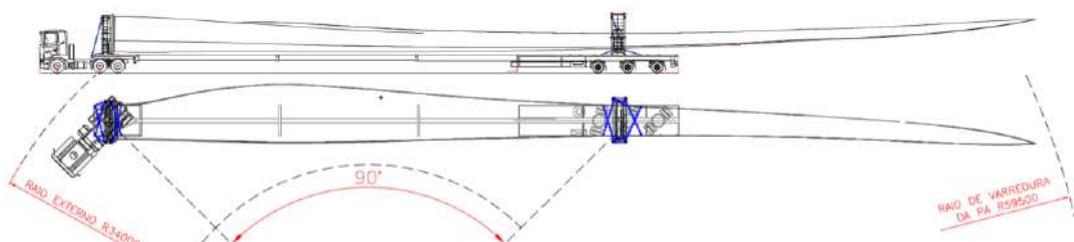
Foi necessário manter atenção e supervisão contínua durante toda manobra, não permitindo acelerações bruscas. A comunicação (via rádio) era constante entre o supervisor, o motorista e o operador da direção dos eixos traseiros.

A operação foi bem-sucedida, comprovando assim a eficácia da solução.

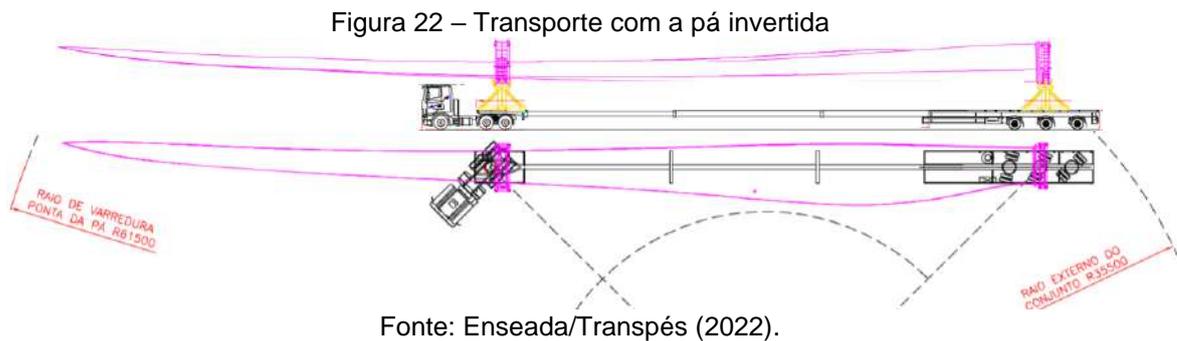
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos dão validade à inovadora tecnologia da “pá invertida” como solução de transporte de pá eólica de maneira segura e baixo custo para cenários com limitações de manobra similares às apresentadas neste trabalho. A solução adotada (pá invertida) extrapola os métodos tradicionais de transporte. Observar a seguir a diferença da dinâmica da manobra entre o transporte convencional (Figura 21) e o transporte da “pá invertida” (Figura 22).

Figura 21 – Transporte convencional de pá eólica



Fonte: Enseada/Transpés (2022).



Durante as sucessivas operações de cinco navios, um total de 120 pás foram desembarcadas sem avarias ou risco potencial. Todas as condutas e normas de segurança exigidas pelo Terminal Enseada foram rigorosamente seguidas.

Buscando a eficiência operacional, todas as operações foram seguidas da prática de “lições aprendidas”. Nesse ínterim, algumas melhorias foram implementadas, como: i) novo método de instalação do dispositivo em substituição à topografia; ii) instalação de batentes metálicos nos dispositivos para evitar eventuais movimentações; iii) aumento da folga das guias melhorando o posicionamento e a retirada da pá no pátio de armazenamento; iv) utilização exclusiva da peação por corrente em substituição do *lockers*; e v) implantação da rotina de verificação dos componentes da suspensão.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre as alternativas apresentadas pelos autores, a inovação teve como ponto de partida a ruptura da tradição de se transportar pás eólicas com a cauda para a parte traseira dos veículos. Criase, então, a partir deste trabalho, um novo conceito em transportes especiais dessa magnitude.

O objetivo proposto de viabilizar a operação pretendida foi atendido de maneira eficiente, resultando na contratação do Terminal Enseada e da Transpés para importar 40 aerogeradores da CGN Brazil Energy.

A metodologia aplicada e o atendimento de todos os critérios de Segurança e Engenharia foram fundamentais para obtenção dos resultados. Além das simulações virtuais, as simulações práticas foram importantes para validação dos conceitos garantindo uma preparação sem incorrer de imprevistos durante a operação.

O dispositivo atende a diferentes tipos de berços, pás eólicas e veículos, inclusive podendo atender diferentes aplicações de transportes especiais. Eventualmente podendo ser modificada algumas características específicas como guias, peação, altura dentre outros. Tal dispositivo teve o pedido de patente registrado no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

O segmento eólico está consolidado e em crescimento mundial frente às políticas ambientais e de sustentabilidade já mencionadas. Logo, o dispositivo da “pá invertida” atenderá com êxito o crescimento da demanda e dos aerogeradores, incluindo os *offshore*, contribuindo para melhor eficiência logística.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA E NOVAS TECNOLOGIAS. *Boletim de Geração Eólica*. [S. l.]: ABEEólica, 2022. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2023/06/Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- BOŠNJAKOVIĆ, M. *et al.* Wind Turbine Technology Trends. *Applied Science*, Basel, v. 12, n. 17, p. 1-19, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/17/8653>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2030*. Brasília, DF: MME: EPE, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-490/PDE%202030_RevisaoPosCP_rv2.pdf. Acesso em: 10 jun. 2023.
- COMETTO. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.cometto.com/modular-systems/spmt-self-propelled-modular-transporter/>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- FAYMONVILLE. Bladelifter. *Faymonville*, [s. l.], 2023a. Disponível em: <https://www.faymonville.com/technology/bladelifter-the-blademax/>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- FAYMONVILLE. TeleMax. *Faymonville*, [s. l.], 2023b. Disponível em: <https://www.faymonville.com/products/flatbed-trailer/telemax>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- GOLDHOFER. FTV 850. *Goldhofer*, Memmingen, [2020]. Disponível em: <https://www.goldhofer.com/en/special-applications/ftv-850>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. World Energy Transitions Outlook 2022. *IRENA*, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2022#page-1>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- JIANG, Y. *et al.* Optimization Design of Ride Comfort for Wind Blade Transporter. *Advanced Materials Research*, [s. l.], v. 189-193, p. 2050-2053, 2011. Disponível em: <https://www.scientific.net/AMR.189-193.2050>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- LIEBHERR GRUPO. Guindaste sobre esteiras LR1400. *LIEBHERR*, [s. l.], [2020a]. Disponível em: <https://www.liebherr.com/pt/bra/produtos/guindastes-moveis-sobre-esteiras-e-pneus/guindastes-sobre-esteiras/guindastes-sobre-esteiras-lr/details/lr1400.html>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- LIEBHERR GRUPO. Guindaste sobre esteiras LR1750. *LIEBHERR*, [s. l.], [2020b]. Disponível em: <https://www.liebherr.com/en/sgp/latest-news/news-press-releases/detail/new-crawler-crane-lr-1750-2-news.html>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- SHELTON, C. Wind power transport: ride like the wind. *International Cranes and Specialized Transport*, [s. l.], 5 ago. 2019. Disponível em: <https://www.internationalcranes.media/news/wind-power-transport-ride-like-the-wind/1139526.article>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- ZHAO, J. *et al.* Design and optimization of the steering system of transport vehicle for large-scale wind turbine blade. *IEEE Xplore*, New York, p. 1-5, 2011. Disponível em: <https://doi:10.1109/FPM.2011.6045718>. Acesso em: 10 jun. 2023.

ESTACAS INJETADAS AUTOPERFURANTES EM FUNDAÇÕES DE AEROGERADORES: EXECUÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS EM UM SOLO COM BAIXA RESISTÊNCIA NO ESTADO DO CEARÁ

Autores [Maria G. Rocha Oliveira¹]

¹ Engenheira Civil no Grupo Cortez

Email¹: mariarocha@cortezengenharia.com.br

RESUMO

A pesquisa teve como objetivo investigar uma solução técnica para as fundações de aerogeradores situados na costa brasileira. A estaca Alluvial Anker® é uma técnica inovadora de execução de fundações por estacas, ainda pouco conhecida no mercado da construção civil. No entanto, essa solução apresenta uma alta capacidade de carga e um processo de execução rápido, o que a torna altamente competitiva em relação às estacas tradicionalmente utilizadas no mercado.

O método de execução dessa estaca envolve a perfuração do solo em alta velocidade por rotação, empregando jatos simultâneos de nata de cimento com médias e altas pressões. Esse processo resulta em um diâmetro final aproximadamente duas vezes maior do que o diâmetro da broca utilizada.

Para comprovar a eficácia dessa solução, foram coletados dados de uma obra real de usina eólica localizada no estado do Ceará. O estudo incluiu a realização de testes de carga e uma análise detalhada do comportamento mecânico da fundação em um solo de baixa resistência. Os resultados obtidos a partir da extrapolação das cargas registradas nos ensaios estáticos foram satisfatórios, o que indica que a estaca Alluvial Anker® apresenta-se como uma promissora solução de fundação para aerogeradores.

Com base nessas informações, pode-se concluir que a estaca Alluvial Anker® mostra-se como uma alternativa viável e eficiente para o suporte de turbinas eólicas na costa brasileira. Sua alta capacidade de carga, rápido processo de execução e resultados satisfatórios nos testes realizados oferecem uma solução promissora para as futuras instalações de aerogeradores nessa região.

Palavras-chaves:

Estacas injetadas autoperfurantes; Aluvial Anker; Fundações de turbinas eólicas; Ensaio de carga.

ABSTRACT

The research aimed to investigate a technical solution for the foundations of wind turbines located on the Brazilian coast. The Alluvial Anker® pile is an innovative technique for executing foundations using piles, still little known in the civil construction market. However, this solution has a high load capacity and a fast execution process, which makes it highly competitive in relation to the piles traditionally used in the market.

The execution method for this pile involves drilling the soil at high speed per rotation, using simultaneous jets of cement paste with medium and high pressures. This process results in a final diameter approximately twice as large as the diameter of the drill used.

To prove the effectiveness of this solution, data were collected from a real wind power plant located in the state of Ceará. The study included carrying out load tests and a detailed analysis of the mechanical behavior of the foundation in a low strength soil. The results obtained from the extrapolation of the loads registered in the static tests were satisfactory, which indicates that the Alluvial Anker® pile presents itself as a promising foundation solution for wind turbines.

Based on this information, it can be concluded that the Alluvial Anker® pile is a viable and efficient alternative for supporting wind turbines on the Brazilian coast. Its high load capacity, fast execution process and satisfactory results in the tests performed offer a promising solution for future installations of wind turbines in this region.

Keywords:

Self-drilling injected piles; Alluvial anker; Wind turbine foundations; Load test.

1. INTRODUÇÃO

Com as políticas ambientais definidas a partir da Rio-92, descritas na agenda 21, os países se comprometeram a desenvolver uma economia em nível mundial mais eficiente e equitativa, bem como o gerenciamento dos recursos naturais e o desenvolvimento sustentável que deve ser um item prioritário na agenda da comunidade internacional. Para alcançar esses objetivos de preservação ambiental e continuar a desenvolver as economias nacionais, algumas nações investiram na utilização de fontes de energia renováveis, buscando equilibrar o desenvolvimento econômico e a preservação do meio ambiente, visto o crescimento desenfreado do uso de combustíveis fósseis.

Com a utilização mais ampla dessas fontes ao longo das décadas, o mundo segue buscando uma gestão mais eficiente de matriz energética e ambiental. O Brasil em 2022 situou-se na 12^o posição das maiores economias mundiais (IMF, 2023), como também reconhecido devido sua geração de energia elétrica sustentável, com mais de 80% da matriz ser proveniente de fontes renováveis (EPE, 2022), sendo evidenciado desde de 2020, ao alcançar a 3^o posição mundial de capacidade instalada de energias renováveis (IRENA, 2023).

Nas duas últimas décadas o país assistiu a uma rápida expansão dos setores de energias renováveis, especialmente o setor eólico que em 2021 registrou a capacidade instalada de 21,57 GW, consolidando-se como a segunda fonte da matriz energética no Brasil, beneficiando 86,3 milhões de pessoas e 28,8 milhões de residências por mês (ABEeólica, 2023). Diante deste cenário, a indústria da construção civil brasileira desenvolveu técnicas e tecnologias que viabilizassem a execução de projetos propostos do setor de energia eólica mesmo em situações controversas.

Antes de qualquer projeto, é essencial realizar estudos de viabilidade, sendo um desafio comum lidar com as características naturais do local da construção. A estabilidade da edificação depende das fundações e do solo, que suportam todas as cargas. Da mesma forma, a instalação de um complexo eólico

requer estudos sobre frequência dos ventos, capacidade de geração e deslocamentos das redes e pessoas, entre outros fatores. Conciliar essas características naturais necessárias para a construção de complexos eólicos é um desafio significativo para a indústria da construção civil.

Aerogeradores enfrentam altas cargas e esforços, assim como intempéries como ventos e vibrações sísmicas. Portanto, as fundações devem ser capazes de suportar forças laterais elevadas, bem como forças perpendiculares de tração e compressão. No Brasil, a construção civil geralmente usa grandes bases gravitacionais com estaqueamento em hélice contínua monitorada (HCM) de grandes diâmetros ou estaca raiz para estabilizar as torres eólicas. No entanto, essas soluções requerem um volume significativo de material e um custo elevado, além de várias fases executivas. Contudo uma alternativa pouco difundida no mercado é o uso de estacas injetáveis autoperfurantes, que são estruturas mais simples e fáceis de executar, especialmente em solos de baixa resistência.

As estacas autoperfurantes têm a capacidade de atingir grandes profundidades em solos de baixa resistência devido à sua capacidade de serem inclinadas em diferentes ângulos, de zero a noventa graus. Isso permite aumentar a resistência lateral, pois o peso do solo exerce uma contribuição sobre a estaca. De acordo com Santos Neto (1981), estacas inclinadas não só se beneficiam da aderência estaca-solo, que é independente da posição da estaca, mas também da contribuição do peso do solo sobre a estaca, o que favorece a capacidade de carga diante de cargas horizontais, como as provenientes de aerogeradores. Essas estacas formam um sistema integrado de estabilidade para a estrutura, por meio dos esforços passivos desenvolvidos no sistema.

A problemática da pesquisa consiste em apresentar um estudo detalhado sobre o processo executivo de uma estaca que ainda não recebeu ampla divulgação, mas que se mostra como uma solução de fundação promissora para turbinas eólicas. Essa estaca em questão possui um diâmetro reduzido, sendo moldada *in loco* através de perfuração rotativa e injeções simultâneas de médias e altas pressões. O objetivo é descrever o comportamento mecânico dessa estaca e fornecer dados provenientes de uma obra de um complexo eólico, incluindo análises de provas de carga realizadas.

2. ESTADO DA ARTE/ FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Estaca Injetável Autoperfurante é uma derivação das microestacas e foi desenvolvida no Brasil na década de 70. Sua origem está ligada a um projeto de um viaduto de acesso entre as rodovias Pedro Taques e dos Imigrantes I, na região da Baixada Santista. Devido às condições complexas do terreno, com presença de rochas, a empresa responsável pela obra, ESTE Geotecnia e Fundações, desenvolveu a primeira microestaca tubular autoperfurante, utilizando nata de cimento como fluido de perfuração. O engenheiro João Duarte Guimarães Filho propôs essa alternativa mais rápida, que foi testada e aprovada por meio de ensaios de carga estáticos. (GUIMARÃES FILHO, 2004).

A empresa Alemã *ISCHEBECK* em 1985 lançou o sistema "*TINTAN Micropile*", um elemento similar ao empregado pela brasileira ESTE, esse elemento similar foi submetido há vários ensaios e testes de carga para verificar sua resistência. Comprovando a alta resistência de suas ancoragens e sendo regida pela norma DIN 4128 (1983). A brasileira foi denominada Alluvial Anker® (AA), como Estaca Tubular com

“fuste adicional de alto atrito lateral e diâmetro mínimo garantido” (ESTE GEOTECNIA E FUNDAÇÕES, 2015).

Mendoza (2013) afirma que a alemã da *ISCHEBECK* se trata de uma estaca constituída de um tubo rosqueado autoperfurante de alta pressão, com diâmetro máximo de 10 cm, o tubo funciona como armadura e aplicador de calda de cimento com pressão definida de projeto. Os tubos são conectados com brocas que variam de 5 a 28 cm, de acordo com o tipo de solo. A estaca é usualmente empregada em solos moles ou granulares, e com pressões distintas para os mesmos, o qual interfere no seu diâmetro final, variando conforme o solo local, sendo duas vezes o diâmetro da estaca em solos de cascalho a 1,2 vezes em solos de rocha muito alterada.

A estaca desenvolvida pelos brasileiros injetada autoperfurante ou Alluvial Anker®, apresenta-se como uma alternativa promissora quando o tempo é um fator determinante. Mendonza (2013) realizou estudos sobre o tempo de execução da Alluvial Anker®, em estacas de 17 centímetros de diâmetro e 8 metros de comprimento, em um solo poroso em Brasília - DF, o autor obteve como resultados um tempo médio de aproximadamente 20 minutos para execução de cada estaca, algumas estacas obtendo resultados de tempo inferior de 15 minutos para execução completa. Porém sua principal utilização no país ainda é como reforço de fundações ou melhoramento de solo, contudo a AA apresenta porte técnico – comercial para competir com estacas já consolidadas no mercado de obras de grande porte como fundações de aerogeradores.

O processo executivo da estaca Alluvial Anker® é semelhante ao da microestaca e estaca raiz, conforme ilustrado na Figura 1, com a diferença de que não utiliza válvulas manchetes. Além disso, uma das grandes vantagens é a sua capacidade de ser executada em qualquer tipo de solo, incluindo aluviões arenosos, tanto acima quanto abaixo do lençol freático. De acordo com Nunes (2013), essas estacas funcionam em um sistema estaca-solo, atuando como um terreno protendido.

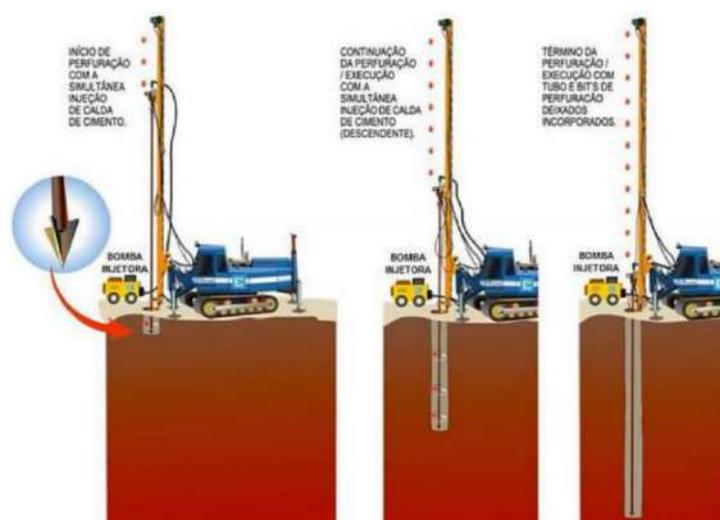


Figura 1 — Sequência executiva de uma estaca Alluvial Anker (ESTE Geotecnica e Fundações 2015)

Nos últimos 50 anos, a Alluvial Anker® passou por aperfeiçoamentos para garantir o diâmetro do fuste, segundo Guimarães Filho (2014), trata-se de um sistema de microestaca tubular que é executado em uma única operação, sem a necessidade de perfurar o solo com água, o que evita deformações e carregamento de finos em solos pouco compactos e colapsáveis durante a perfuração. Esse sistema é autoperfurante, com o tubo equipado com aletas e injeção simultânea de nata de cimento, que também atua como o fluido de perfuração. A estaca é formada pelo tubo com diâmetro definido pela rotação das aletas, sendo o próprio tubo a armadura principal da estaca, desde a superfície até a ponta, e todo esse processo ocorre em questão de minutos. A injeção de nata de cimento penetra no maciço, desagrega o solo e mistura-se ao cimento, aumentando sua resistência e transformando-o em uma ancoragem contínua, um solo "super armado" (Figura 2).

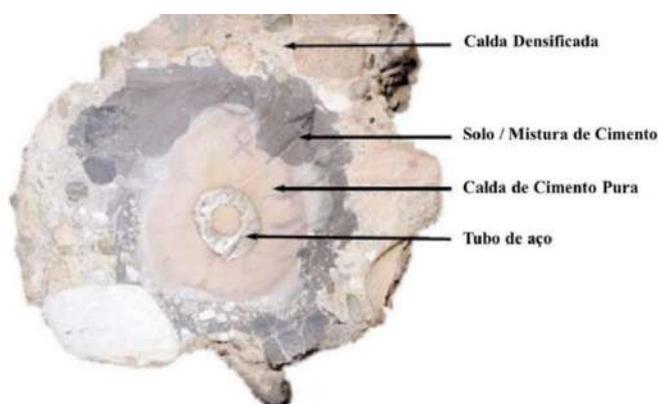


Figura 2 — Seção de uma EIA (ASCHENBROICH 2001).

A ancoragem estaca-solo é obtida pela perfuração e injeção simultânea, através de ferramenta que executa o fuste de alta aderência com diâmetro duplicado. O método descrito não provoca vibrações nem deslocamentos no terreno, ou seja, provocam mínima perturbação do maciço. O Alluvial Anker® é uma microestaca moldada in loco usando um tubo de aço sem costura adaptado para perfurar o solo por rotação. O tubo de aço N80 serve como armadura principal da estaca, proporcionando alta resistência à compressão, flexão, cisalhamento e flambagem. Armaduras complementares, como barras de aço ROCSOLO ou CA50, podem ser adicionadas para aumentar a resistência em compressão, cisalhamento e flexão. Essas armaduras são inseridas antes do endurecimento da calda de cimento, e a armadura complementar ROCSOLO pode ser estendida por meio de luvas de extensão e fixada com porcas em segmentos de estacas com maiores tensões.

Na ponta da estaca localiza-se um elemento de aço para perfuração (ponteira de perfuração), a qual possui ferramenta de corte (perdida) e passagem de fluido (calda de cimento) em formato de seta ou tricône, com função de perfurar trechos de forma rotativa, proporcionando o alargamento do fuste, com o aumento da área lateral, contribuindo para elevar a capacidade de carga. Em solos com coesão significativa, opta-se por utilizar ponteira tipo tricône, para garantir o avanço da perfuração, devido melhor desagregação durante a perfuração. Contudo, ocorre uma dispersão maior do fluido, devido o atrito com a ponteira tipo tricône (Figura 3), o que aumenta o refluxo e pela mistura com os resíduos sólidos da perfuração.

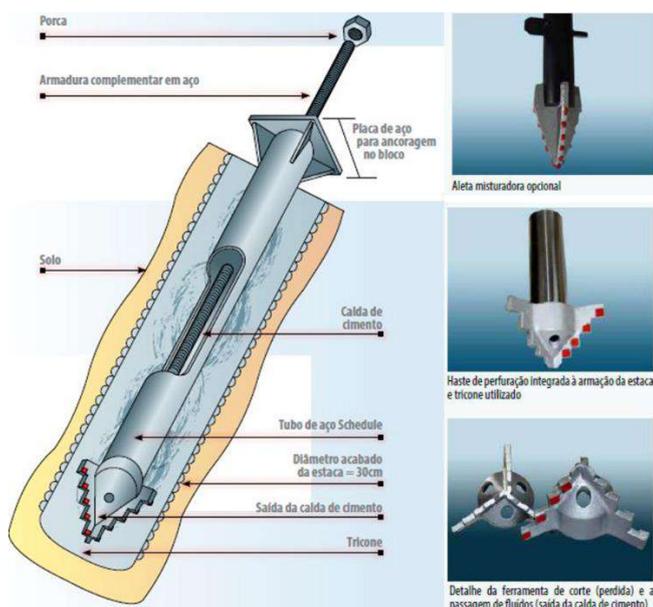


Figura 3 — Detalhamento da estaca Alluvial Anker (Adaptado ESTE Geotecnia e Fundações 2015)

Mesmo o aço sendo o principal responsável pela resistência da AA, as operações de injeção têm um grande impacto sobre a capacidade da microestaca, a calda de cimento tem a função de transferir as cargas ao solo circundante, promovendo um maior atrito lateral e protegendo as armaduras de corrosão.

A calda de cimento para injeção deve apresentar propriedades adequadas de fluidez, estabilidade e durabilidade, e para a correta injeção de calda de cimento é necessário que a central de injeção seja instalada de forma a facilitar o bombeamento e injeção da calda, evitando que a mesma possa interferir no processo executivo e na produtividade do serviço.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA DE CAMPO (EÓLICA BONS VENTOS)

A pesquisa baseia-se em duas etapas principais, uma breve revisão bibliográfica, na qual foi apresentado o processo executivo da Alluvial Anker®, bem como sua caracterização mecânica e a fundamentação teórica baseada em estudos de referência. Consoante a isto, neste capítulo será apresentado a análise dos dados de prova de carga das AA da obra da Usina Eólica de Bons Ventos, no estado do Ceará.

Entre 2007 e 2008, o Ceará se tornou líder nacional em capacidade instalada de energia eólica, com um crescimento anual notável de 29,5%, representando um aumento de 22,3% em relação ao ano anterior. Durante esse período, foi construído o maior complexo eólico do Brasil na época. A empresa Bons Ventos Geradora de Energia S/A foi fundada em 2007 como parte do programa PROINFA, com o objetivo de implantar e operar quatro parques eólicos nos municípios de Aracati e São Gonçalo do Amarante, no Ceará, por 20 anos. O complexo possui 75 aerogeradores modelo Suzlon S-88, fabricados pela Suzlon, com uma potência total instalada de 155 MW. Cada turbina tem uma potência de 2100 kW,

um rotor com 88 metros de diâmetro e torres de aço de 80 metros de altura. Essas turbinas operam em velocidade nominal de 14 m/s.

O investimento total no complexo foi de R\$ 750 milhões. Sua produção anual atingia 550.000 MWh, o suficiente para fornecer energia a aproximadamente 500 mil pessoas através do sistema interligado nacional.

Inicialmente, o projeto do complexo previa o uso de fundações superficiais com área de 113,10 m², ancoradas em estacas do tipo HCM. No entanto, a execução dessas estacas no local da obra se mostrou inviável devido à presença de dunas móveis. Alguns dos fatores inviáveis para utilização dessas estacas nessa formação geológica foram:

- Devido ao solo arenoso da área, a perfuratriz não teria estabilidade e apoio das esteiras;
- A necessidade de guias ou máquinas similares para erguer e instalar as armaduras das fundações profundas.
- A exigência de caminhões betoneiras e a necessidade de uma usina de concreto a uma distância máxima de 2,5 horas para evitar a utilização de aditivos que aceleram o tempo de endurecimento, o que aumentaria o custo das fundações, além dos gastos com transporte.
- Risco de entupimento da tubulação devido ao endurecimento ou segregação dos materiais do concreto.

Para enfrentar esses desafios, foram utilizadas microestacas injetáveis autoperfurantes devido à facilidade de instalação e à presença de uma central de injeção no local. As fundações superficiais adotadas para o complexo consistiam em bases circulares de concreto, com diâmetro de 11 metros e área de 50,27 m². Cada base era sustentada por 36 estacas Alluvial Anker®, com diâmetro de 300 milímetros. As estacas tinham inclinações variando de 0 a 12° e seus comprimentos variavam de 10 a 27 metros, totalizando a execução de 2.700 estacas ao longo da obra, garantindo a estabilidade das fundações.

Considerando a extensão considerável do complexo eólico e as características geotécnicas semelhantes nos dois municípios envolvidos, juntamente com a instalação de cerca de 90% dos aerogeradores no município de Aracati, o autor escolheu conduzir o estudo com base em dados de um parque eólico específico localizado em Aracati, no Ceará.

3.1 Caracterização geológica e geotécnica da obra

De acordo com Pedrosa (2016), a Costa Nordeste do Brasil, onde está localizada a obra em questão, é predominantemente composta pelos sedimentos terciários da Formação Barreiras. Esses sedimentos, parcialmente trabalhados durante o Pleistoceno e Holoceno, originaram os tabuleiros costeiros e os campos de dunas na região. Esses sedimentos da Formação Barreiras se sobrepõem ao embasamento cristalino e aos depósitos mais antigos pertencentes às diversas bacias sedimentares que ocorrem na margem continental brasileira. Bezerra (2001) complementa que a Formação Barreiras representa o último depósito sedimentar terciário na região Nordeste do país, formada durante a história da abertura do Atlântico, essa formação sedimentar se estende por mais de 4.000 km do litoral nordestino.

Sales (2002) aponta as dificuldades de se distinguir os sedimentos Barreiras dos depósitos dunares antigos. No presente, eles são atingidos pelas ondas que atuam no litoral cearense, pela ação dos ventos alísios e das brisas marítimas, e pela dissecação fluvial, sendo este o mais importante entre

os processos morfológicos, contudo esse processo resulta da pequena espessura dos depósitos Barreiras, o que não é evidenciado no local de instalação dos aerogeradores.

As dunas móveis, por sua vez, são formações características das regiões costeiras e estão diretamente relacionadas à presença dos sedimentos da Formação Barreiras. Essas dunas são moldadas pelos ventos dominantes na região e podem apresentar diferentes formas e tamanhos. Pedrosa (2016) descreve as dunas móveis como uma característica marcante da zona costeira do Ceará. Elas representam apenas uma parte minoritária dos campos de dunas, enquanto a maioria é composta por campos antigos. Em Aracati - CE, as praias estão situadas em uma extensa área de dunas móveis com solo arenoso de espessura elevada (Figura 4).

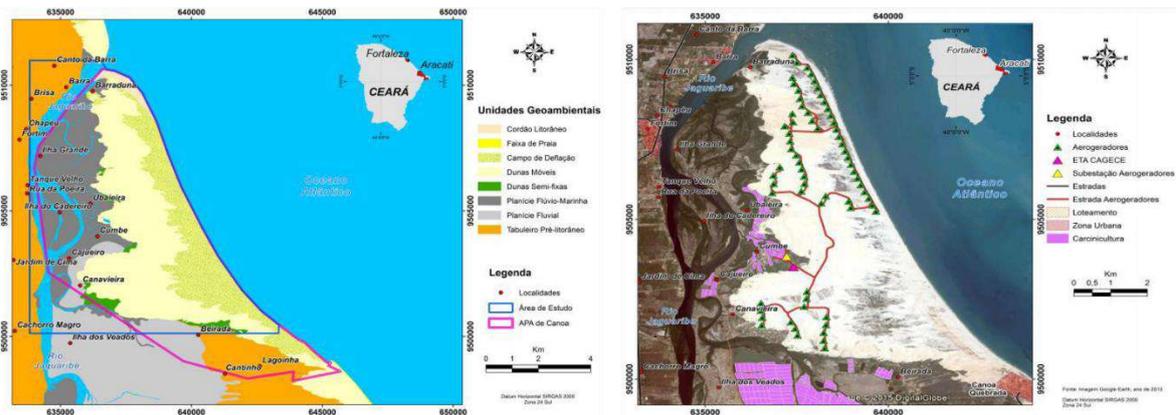


Figura 4 — Unidade geoambientais de Aracati - CE com localização dos aerogeradores (Adaptado Pedrosa 2016)

Conforme ensaio penetração *Standart Penetration Test* (SPT) da área de um dos aerogeradores apresentado na Figura 5, o perfil geotécnico na área correspondente a usina e os estudos geológicos realizados apresentados na Figura 4, conclui-se que a área é caracterizada por mais de 35 metros de solo arenoso, com granulometria fina, e compactidade crescente com a profundidade. Nos 7 primeiros metros apresenta índice de resistência a penetração (N_{spt}) com valor médio aproximado de 28, caracterizando camadas de solo mais compactos, seguidas de 23 metros de solo com índices a penetração baixos, caracterizando um solo arenoso fofo.

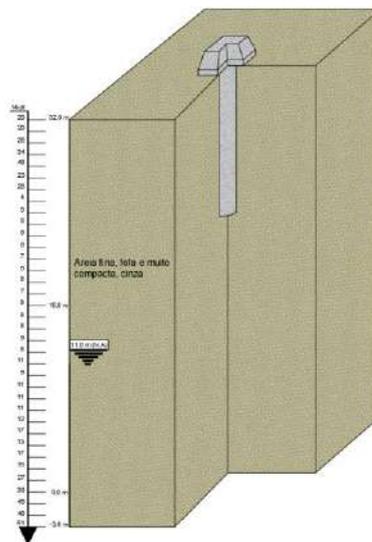


Figura 5 — Ensaio a percussão SPT de um aerogerador da obra (Adaptado TECNORD 2008)

3.2 Ensaio de carga

Realizaram-se testes de carga *in loco* utilizando cavaletes ancorados em estacas Alluvial Anker® com comprimentos variados, próximos à base dos aerogeradores, para simular carregamentos realistas e preservar as características geotécnicas do solo local. Os cavaletes foram reforçados em compressão e tração, utilizando quatro barras de aço Rocsolo 40 t para conexão com o sistema de reação. Além disso, nas estacas submetidas a ensaios de compressão e tração, foram adicionadas duas barras de aço Rocsolo de 38 mm, fixadas com porcas soldadas no tubo de aço de 3½" (armação das microestacas) conforme figura 6.

Para os testes de carga, foram utilizadas bombas manuais e hidráulicas com capacidade de aproximadamente 4.000 kN, aplicando carga no cavalete por meio de um sistema de atiramento usando as estacas AA. Foi colocada uma placa metálica de 20 milímetros no topo das estacas para receber o macaco hidráulico, e nos ensaios de compressão e tração, utilizou-se uma viga metálica dupla de 4 metros de comprimento para transferir as cargas.

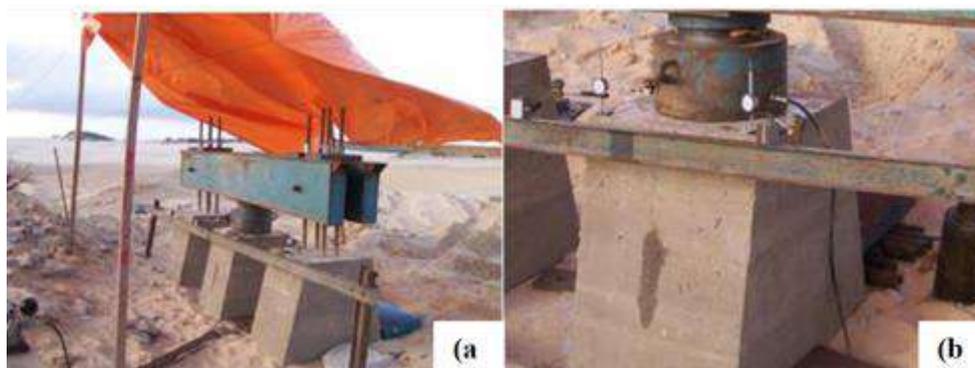


Figura 6 — Prova de cargas dos cavaletes: a) Ensaio a tração; e b) Ensaio a compressão (SILVA 2011)

As provas de carga analisadas neste estudo referem-se à fundação superficial N° 11 do Parque Eólico Canoa Quebrada, localizada no centro do complexo no município de Aracati – CE. Dentre as provas de carga disponibilizadas pela ESTE Geotécnica e Fundações, foram selecionadas quatro provas estáticas, sendo duas em compressão e duas em tração, executadas na base NCQ - 11. Todas as provas foram realizadas em estacas com 12,45 metros de comprimento e 0,30 metros de diâmetro, permitindo a comparação de dados entre diferentes estacas do mesmo aerogerador.

No ensaio de compressão da estaca EC - 01 da base NCQ- 11 (Figura 7a), foram aplicadas cargas progressivas em 10 estágios, com um incremento de 150 kN por estágio, atingindo uma carga máxima de aproximadamente 1500 kN. Em seguida, foi realizado o descarregamento em 5 estágios, com uma redução de 300 kN por estágio. O gráfico resultante do ensaio apresentou uma resposta linear, com um recalque máximo de cerca de 2% do diâmetro da estaca. Ao final do processo de descarregamento, foi observado um recalque residual de 1,17 mm, indicando uma recuperação elástica quase total da estaca.

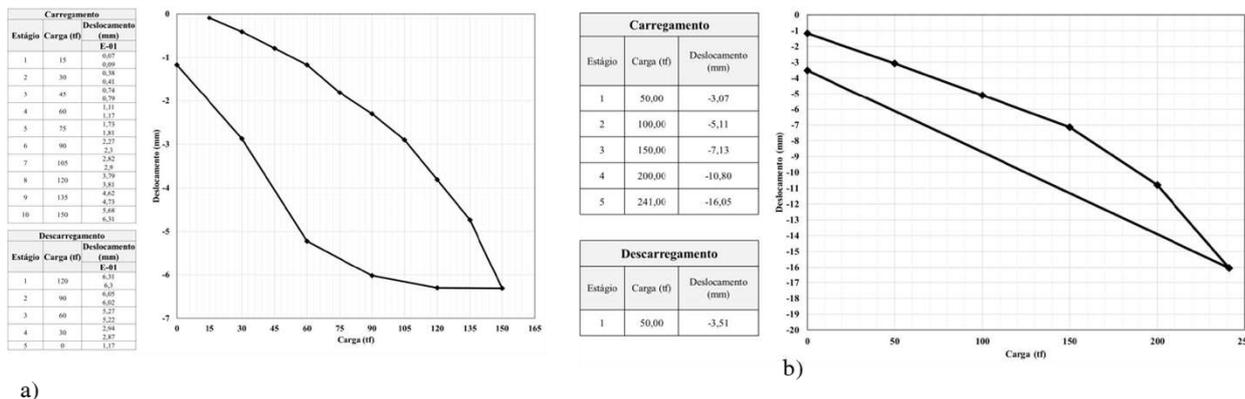


Figura 7 — Prova de carga compressão a) EC -01 – NCQ – 11; b) EC -02 – NCQ – 11 (Adaptado TECNORD ESTE Geotecnia e Fundações 2008)

No ensaio de compressão rápida da estaca EC-02 da base NCQ - 11, foram realizados ensaios de compressão e tração. No ensaio de compressão, à estaca foi submetida a uma carga máxima de aproximadamente 2410 kN (Figura 7b), que era três vezes maior que sua carga de projeto. O recalque máximo observado foi de 5,35% do diâmetro da estaca. O carregamento foi feito em cinco estágios, com incrementos de 500 kN por estágio. O ensaio teve que ser interrompido quando atingiu 2410 kN devido a um vazamento em um macaco hidráulico, impossibilitando a continuação dos carregamentos. O descarregamento foi concluído em um único estágio, e as leituras foram registradas após o descarregamento total.

As estacas ET-01 e ET-02, na base NCQ - 11, foram submetidas a ensaios de tração, com carga correspondente a duas vezes a carga de trabalho prevista (Figura 8), conforme recomendado pela ABNT NBR 6122/2019, ou seja, 750 kN. Após a estabilização da carga, que ocorreu em 10 estágios com incremento de 75 kN por estágio, foi observada uma perfeita interação entre o sistema estaca-solo, conforme evidenciado na curva. Ambas as microestacas apresentaram comportamento semelhante na fase plástica, com recalques progressivos crescentes, porém sem uma ruptura definida, com recalques inferiores a 5 mm, ou seja, menores que 2% do diâmetro da microestaca.

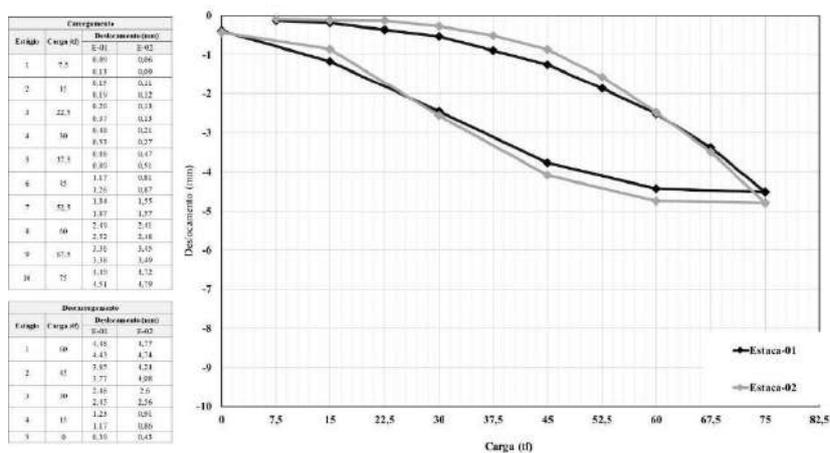


Figura 8 – Prova de cargas de tração – ET -01 e ET - 02 – NCQ-11 (Adaptado TECNORD ESTE Geotecnia e Fundações 2008)

Para os mesmos recalques, as microestacas apresentaram resistência à tração de 75% ou mais da resistência à compressão, atendendo satisfatoriamente às afirmações de McClelland (1972), que sugere que o atrito lateral na tração seja aproximadamente 70% do atrito lateral na compressão, e também de Poulos e Davis (1980), que recomendam considerar o atrito lateral na tração igual a 2/3 da compressão. Os recalques residuais das estacas após o descarregamento foram de 0,43 mm, correspondendo a menos de 0,15% do diâmetro da estaca.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Devido à ausência de ruptura nos ensaios estáticos realizados no complexo eólico, o autor optou por utilizar o método de Van der Veen (1953) para extrapolar as cargas e obter os valores limite de trabalho para as estacas ensaiadas. A extrapolação das cargas de ruptura foi realizada conforme a metodologia proposta por Aoki (1976), utilizando o coeficiente linear da reta de regressão entre os pontos representados por $\ln(1-Q/Qult) \times \rho$. Foi empregado um método iterativo automatizado, utilizando uma planilha eletrônica do Excel com programação adicional em VBA (*Visual Basic for Applications*).

No ensaio de compressão da estaca 01 da base NCQ-11, foi obtida uma carga de ruptura extrapolada equivalente a duas vezes a carga de trabalho, resultando em um recalque máximo de aproximadamente 9% do diâmetro da estaca. A linearidade do gráfico indica um comportamento consistente (Figura 9).

No ensaio de compressão da estaca 02, foi registrada uma carga de ruptura superior a quatro vezes a carga de trabalho, e 1,42 vezes a carga do último estágio antes da interrupção mecânica do equipamento. O recalque máximo com a carga máxima representa 43% do diâmetro da estaca, ou seja, 10,34% do seu comprimento total, demonstrando alta resistência à ruptura (Figura 8). No entanto, a estaca não atenderia a outros critérios sob cargas tão elevadas.

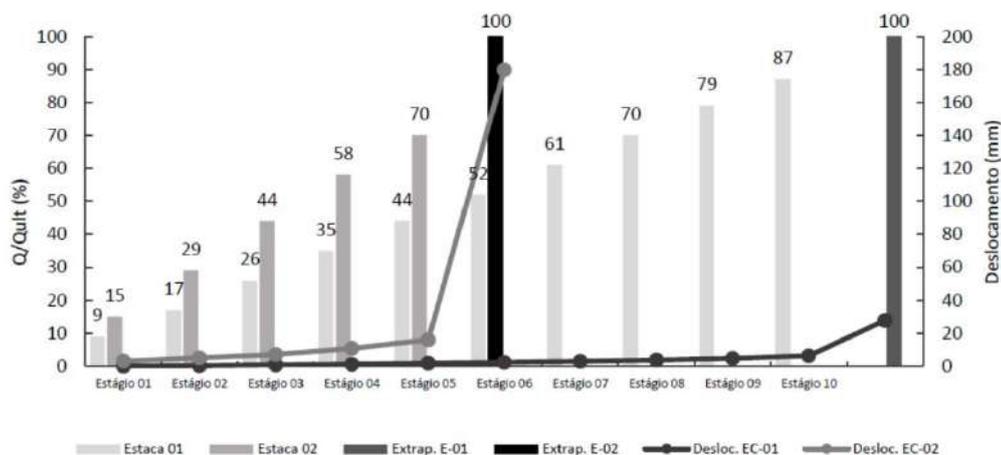


Figura 9 – Extrapolação carga de ruptura a compressão EC – 01 e EC - 02 – NCQ - 11 (Autor 2023)

Nos ensaios de tração das estacas, foi observado que as cargas de ruptura extrapoladas eram próximas às cargas registradas no último estágio. No entanto, o deslocamento ao atingir a carga de ruptura era significativamente maior (2,9 vezes para a estaca 01 e 2,3 vezes para a estaca 02) em comparação

ao último estágio, indicando uma rápida evolução do deslocamento na ruptura. Isso pode representar uma desvantagem para análises futuras (Figura 10).

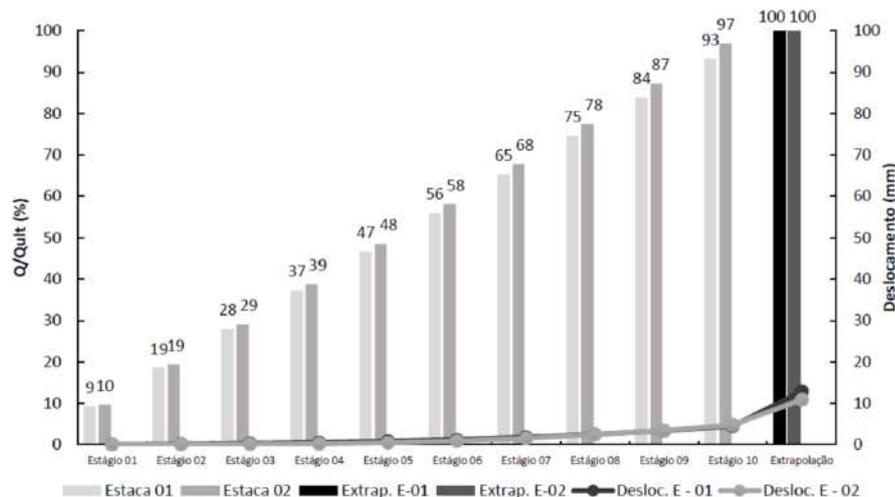


Figura 10 – Extrapolação carga de ruptura a tração ET – 01 e ET - 02 (Autor 2023)

A Tabela a seguir (Figura 11) resume os resultados das provas de carga e compara-os com as cargas limites obtidos através da extrapolação pelo método de Van Der Veen (1953), com o incremento proposto por Aoki (1976). É possível observar que tanto nos ensaios de compressão como nos ensaios de tração das estacas 01 e 02, o desempenho foi satisfatório de acordo com a norma ABNT NBR 6122/2019, que estabelece um fator de segurança mínimo de 2,0 em relação à carga de ruptura nos ensaios e em sua extrapolação.

Tipo	Ensaio estático	Estaca	Deslocamento total (mm)	Deslocamento residual (mm)	Carga de trabalho	Carga de Ruptura (Van Der Veen)	Fator de Segurança
Compressão	Lento	EC-01	6,31	1,17	735,50 kN	1685,00 kN	2,29
	Rápido até a ruptura	EC-02	16,05	3,51	735,50 kN	3369,00 kN	4,58
Tração	Lento	ET-01	4,51	0,43	367,75 kN	789,00 kN	2,15
	Lento	ET-02	4,79	0,43	367,75 kN	759,00 kN	2,06

Figura 11 – Resumo dos resultados das provas de carga (Autor 2023)

Segundo Velloso e Lopes (2010), o ensaio lento é mais representativo das condições de carregamento em uma fundação sob uma estrutura futura. À medida que a carga se aproxima da ruptura, o tempo necessário para a estabilização aumenta, indicando um comportamento mais realístico do sistema solo-estaca. Ensaios rápidos tendem a produzir um aumento na capacidade de carga e rigidez do sistema, o que pode alterar as relações entre as cargas e os recalques. Portanto, as provas de carga lentas são consideradas mais realistas. No ensaio rápido, observou-se um aumento contínuo no deslocamento da estaca à medida que o carregamento avançava, representando um desafio futuro em termos de análise e aprimoramento do sistema. É importante ressaltar que a estaca apresentou melhores resultados de deslocamento no ensaio lento.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- O tubo de aço N80, armadura principal da Alluvial Anker® é o principal responsável pela resistência estrutural da microestaca a compressão, flexão, cisalhamento e flambagem, sendo a calda de cimento apenas responsável pela transferência das cargas ao solo circundante;
- Apesar da possibilidade de execução da Alluvial Anker® sem armadura complementar, e o tubo de aço N80 ser a armadura principal, as armaduras complementares contribuem para a resistência a compressão, cisalhamento e flexão;
- A calda de cimento injetada a altas pressões penetra nos vazios do solo, o que permite uma ancoragem contínua, sem ruptura hidráulica do solo, e transformando o sistema em um solo super-armado;
- A evolução na distinção das ponteiras, conforme o tipo de solo, permite uma execução mais rápida da perfuração e injeção, e conseqüentemente da execução da estaca;
- Na Alluvial Anker® em relação as demais microestacas pode ser observado uma ancoragem contínua, diferentemente das demais microestacas e da estaca raiz, que ao utilizar injeção por fases, não conseguem repetir fases rigorosas e alcançam pseudo injeções, e conseqüentemente bulbos parciais;
- A utilização de estacas injetáveis autoperfurante em fundações de aerogeradores podem gerar economia, tendo em vista a redução do tempo de execução em relação aos outros tipos de estacas.
- As estacas Alluvial Anker® ensaiadas no estudo de caso desta pesquisa resistiram a valores superiores a pelo menos duas vezes a carga de trabalho, ou seja, atendendo o fator de segurança mínimo normativo;
- A microestaca injetável autoperfurante mantém o desempenho de resistência em solo com baixa resistência como o solo arenoso fino como nas formações barreiras, encontrado na grande parte do litoral nordestino brasileiro, locais que apresentam características físicas para implantação de usinas eólicas.
- Recomenda-se realizar ensaios em grupo de estacas AA, para obter dados reais do comportamento do grupo de estacas e não somente de uma estaca isolada;
- É essencial para a comprovação da viabilidade da estaca em fundações de aerogeradores realizar análises com um número maior de provas de cargas de solos com formações variantes, para comparar o comportamento da Alluvial Anker® em solos distintos comumente executados usinas eólicas;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e Execução de Fundações (NBR 6122)**. Rio de Janeiro, 2019. 108p.

ASCHENBROICH, H. **Micropile Reinforcement Systems and Corrosion Protection**. Ln: Micro-pile Seminar, 2001, Charlotte. Anais... North Carolina: ADSC, 2001. v. 1, p. 1 – 12.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA – ABEEólica. **Boletim anual 2021**. Disponível em: <https://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2022/07/ABEEOLICA_BOLETIMANUAL-2021_PORT.pdf>. Acesso em 21 junho 2023.

BEZERRA, F. H. R. et al. **Pliocene-quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil**. Journal of South American Earth Sciences. Amsterdam, v. 14, p. 61-75, 2001.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em 15 junho 2023.

ESTE GEOTECNIA E FUNDAÇÕES LTDA. **Catálogo técnico**. Brasília, 2015. 8 p.
GUIMARÃES FILHO, J. D. **Estacas injetadas**. Seminário sobre Fundações Profundas, Porto Alegre, PUCRS, outubro, 2004.

GUIMARRÃES FILHO, J. D. **Microestaca tubular injetada de bulbo contínuo (Alluvial Anker)**. Revista Fundações & Obras Geotécnicas. ed. 41, 2014. p. 52 – 59.

INTERNATIONAL MONETARY FUND - IMF. **World Economic Outlook: A Rocky Recovery**. Washington, DC, October, 2023. p. 206.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY-IRENA. **Renewable energy statistics 2023**. Abu Dhabi, 2023. 440p.

MCCLELLAND, B.. **Design and performance of deep foundations**. In: **Specialty Conference on performance of earth and earth supported structures**, ASCE, 1972, Indiana. Proceedings... v. 2, p. 111-142, 1972.

MENDOZA, C.C. **Estudo do comportamento mecânico e numérico de grupo de estacas do tipo Alluvial Anker em solo poroso do Distrito Federal**. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 2013. 234p.

NUNES, S. C. O. **Métodos de dimensionamento de reforço e estabilização de taludes com microestacas**. Tese para obtenção do grau de mestre em Engenharia Civil, Faculdade de ciências e tecnologia Universidade de Coimbra, Coimbra, 2013. 83p.

PEDROSA, A. A., **A geodinâmica e morfogênese das dunas eólicas no município de Canoa Quebrada, Aracati, Ceará, Brasil**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, UFC. 2016. 111p.

POULO, H. G., DAVIS, E. H., **Pile foundation analysis and design**. New York. John Wiley & Sons, 1980. 397p.

SALES, C. V. C. **Les littoraux Du Ceará: evolution géomorphologique de la zone côtière de L ´Etat Du Ceará**, Du long terme au court terme. Sorbonne. Thèse Doctorat, Université Paris. 2002. 523p.

SANTOS NETO. **Métodos de cálculo de atrito negativo em estacas: estudo e discussão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – I Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 1981. 244p.

SILVA, R. R. C. da. **Estacas Injetadas Autoperfurantes: metodologia de execução e determinação de sua capacidade de carga através de métodos semi – empíricos**. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo. 2011. 216p.

TECNORD - ESTE Geotecnia e Fundações Ltda. **Provas de cargas**. São Paulo, 2008. 1 p.

VAN DER VEEN, C. **The bearing capacity of a pile**. Ln: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., Zurich. Proceedings... ISSMFE, 1953. v.2, p. 84-90.

VELLOSO, D. A., LOPES, F. R. **Fundações: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 583p.vesic

PROCESSAMENTO DE SINAL INFRAVERMELHO GERADO POR TERMOGRAFIA ATIVA COMO POSSIBILIDADE DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVO PARA PÁS DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE

M. C. FRANÇA^{1*}, L. F. V. de S. PAIXÃO¹, D. B. RIFFEL¹

¹Department of Mechanical Engineering, Federal University of Sergipe, University City Prof. José Aloísio de Campos, São Cristóvão 49100-000, Brazil.

*eng.mayarafranca@gmail.com

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo de processamento de imagem termográfica para análise do estado de pás de aerogeradores de pequeno porte mediante os parâmetros de efusividade térmica, fator de incompatibilidade térmica, contraste térmico padrão e aplicação do modelo de resfriamento baseado na lei de resfriamento de Newton. Utilizou-se a termografia ativa como ensaio não destrutivo (END) que nas últimas décadas vem apresentando excelentes resultados em diversas aplicações. Elaborou-se um planejamento experimental utilizando corpos de provas com materiais similares aos utilizados nas pás dos aerogeradores. Estas amostras passam por um estágio de aquecimento, processo que caracteriza a termografia ativa. Posteriormente com uma câmera infravermelho captura a imagem da superfície em análise e registra o resfriamento da superfície. Nesta etapa as falhas internas podem ser detectadas através da diferença na difusividade térmica em regiões sadias em comparação com as regiões com falhas. O processamento dos dados gerados permite extrair características das propriedades físicas de falhas internas que são as regiões de interesse. Para isto é preciso analisar os termogramas gerados com uma taxa de 30 frames por segundo. O vídeo desenvolvido foi gravado por 300 segundos o que nos entrega uma grande quantidade de dados. A câmera FLIRT420 captura as imagens com dimensão de 240x320 pixels, portanto a matriz analisada possui a dimensão de 240x320x9000. O pós-processamento objetiva identificar falhas como: a delaminação, vacâncias ou adesão entre regiões. Estas falhas se diferenciam em relação a profundidade e dimensão. Através do pós-processamento proposto dos dados foi possível identificar as áreas com falhas e determinar a profundidade máxima detectável pela técnica.

Palavras-chaves: Processamento de termogramas. Ensaios não destrutivos (END). Identificação de defeitos internos. Qualidade das pás.

ABSTRACT

This work aims to present a thermographic image processing study for analysis of the state of small wind turbine blades through the parameters of thermal effusivity, thermal incompatibility factor, standard thermal contrast and application of the model based on the Newton's Cooling Law. Active thermography was used as a non-destructive test (NDT), which in recent decades has taken on proportions in academic studies due to the data processing capacity of computers. An experimental design was elaborated using test specimens with materials similar to those used in wind turbine blades. These samples go through a heating stage, a process that characterizes active thermography. Subsequently, with an infrared camera, it captures the image of the surface under analysis and records the cooling of the surface. In this step, internal faults can be detected through the difference in thermal diffusivity in healthy regions compared to regions with faults. The processing of the generated data allows extracting characteristics of the physical properties of internal faults that are the regions of interest. For this, it is necessary to analyze the thermograms generated

at a rate of 30 frames per second. The developed video was recorded for 300 seconds, which gives us a large amount of data. The camera (FLIRT420) captures images with dimensions of 240x320 pixels, so the analyzed matrix has dimensions of 240x320x9000. Post-processing aims to identify flaws such as: delamination, vacancies or adhesion between regions. These faults differ in terms of depth and dimension. Through the proposed post-processing of the data, it was possible to identify the areas with flaws and determine the maximum depth detectable by the technique.

Keywords: Processing of thermograms. Non-destructive testing (END). Identification of internal faults. Blade quality.

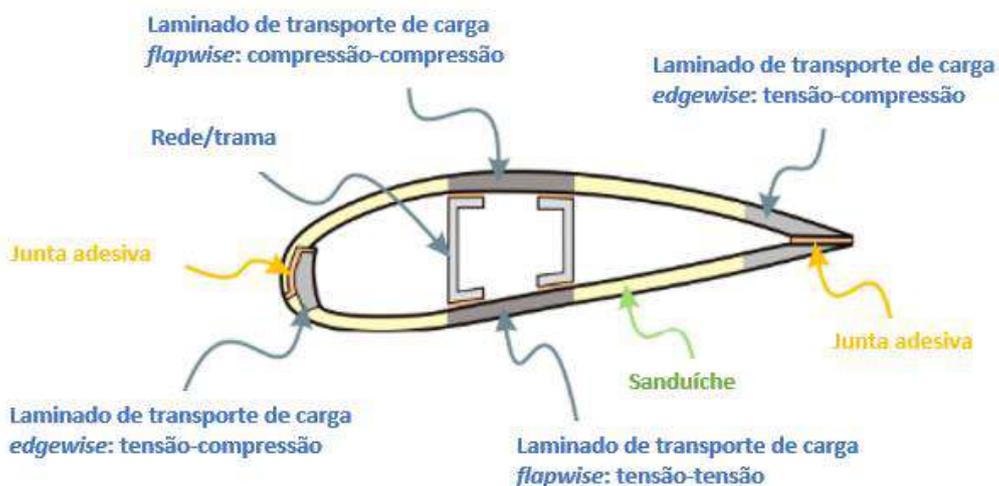
1. INTRODUÇÃO

A energia eólica como um tipo de fonte de energia renovável tem recebido atenção considerável em todo o mundo e seu desenvolvimento está crescendo a uma taxa sem precedentes nos últimos anos. No sistema de turbina eólica, as pás de um rotor são geralmente consideradas como um dos componentes mais críticos (CHEN *et al.*, 2014). JENSEN *et al.* (2021) apresentam estudos sobre detecção de defeitos subsuperficiais em estruturas de fibra de vidro. MÁRQUEZ E CHACÓN (2020) revisaram os END aplicados em pás de aerogeradores. MAIERHOFER *et al.* (2018) avaliam diferentes técnicas de atividade termografia para quantificação de defeitos artificiais em compósitos reforçados com fibra usando análise térmica e contraste de fase. Estas pesquisas reforçam o crescimento dos estudos neste setor e a importância de buscar garantir a qualidade das pás de turbinas eólicas.

As técnicas de monitoramento baseadas em vibração são bem compreendidas e amplamente adotadas para monitorar a condição de máquinas rotativas. No entanto, no caso de turbinas eólicas, a vibração medida é complexa devido ao alto número de fontes de vibração e ao fenômeno de modulação. Portanto, extrair informações relacionadas à condição de um elemento específico, por exemplo, a condição das pás é muito difícil. As condições de funcionamento do aerogeradores submetem as pás a processo de vibração severas que danificam a sua estrutura (ABOUHNIK *et al.* 2012).

As pás de uma turbina eólica consistem em duas faces, no lado da sucção e no lado da pressão, unidas e reforçadas por uma ou várias redes/tramas integrais de cisalhamento que ligam as partes superior e inferior do casco da pá. A Figura 1 apresenta o esquema de seção de uma pá de turbina eólica. A carga *flapwise* é causada pela pressão do vento, e a carga *edgewise* é causada pela gravidade (MISHNAEVSKY *et al.* 2017).

Figura 1: Esquema de seção de uma pá de turbina eólica.



FONTE: MISHNAEVSKY *et al.* (2017)

As cargas estáticas e as cargas cíclicas aplicadas à estrutura das pás durante testes em escala real podem resultar em falhas de vários tipos, como: delaminação das camadas adesivas e laminada, descolamento nas interfaces da pele e divisão ao longo das fibras de falha compressiva no plano, bem como o deslocamento da pele e rachaduras na camada de gel (MISHNAEVSKY *et al.* 2017).

JOSHUVA (2018) revisa a bibliografia de estudos de falhas de pás de turbinas eólicas analisando os seguintes tipos de ensaios: técnica acústicas, espectrograma de ressonância local, técnica de eco de ultrassom, monitoramento visual, monitoramento ótico, emissão acústica, ultrassom e radiografia. Ao contrário do modo passivo, a termografia ativa é nomeada assim pois necessita de aquecimento ou resfriamento a fim de que se obtenha significativas diferenças de temperatura e as discontinuidades possam ser reveladas (MALDAGUE, 2001).

GRYS (2011) indica que a detecção de heterogeneidade na distribuição de temperatura de termogramas, sem justificativa na estrutura e construção, é pré-requisito para qualificar áreas com defeitos. O conhecimento da geometria e profundidade do defeito facilita para modelarmos a causa e a ocorrência das falhas. A falta de padrões dificulta a difusão dos Ensaios Não-Destrutivos por termografia ativa na indústria. Isso indica que é crucial investigar suas propriedades metrológicas e limitações para fins de aplicações práticas.

Os materiais compósitos são usados tipicamente em pás e naceles de turbinas eólicas. Os geradores e torres são fabricados a partir de metais. As pás são a parte mais importante que aerodinamicamente converte a força do vento através da turbina em energia elétrica, e o componente de maior custo das turbinas (MISHNAEVSKY *et al.* 2017). A intercorrência de falha em uma das pás após centenas de horas de operação intermitente é apresentada na turbina eólica de *Smith* (1941). Assim, a importância da escolha adequada dos materiais e limitações inerentes de metais como material para pás foi demonstrado no início da história do desenvolvimento da energia eólica (WILBERFORCE *et al.*, 2023)

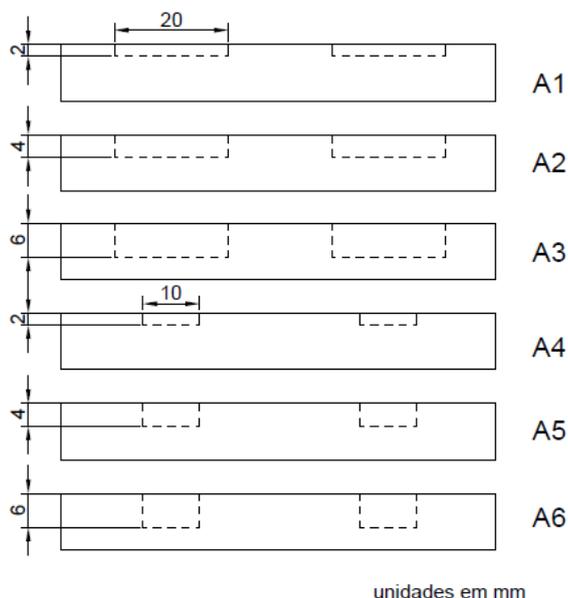
MISHNAEVSKY *et al.* (2017) apresentam uma breve visão geral de materiais compósitos para aplicações em turbinas eólicas. Revisam os materiais de turbinas eólicas, e apresentam a necessidade de utilizar compósitos reforçados para construção das pás. Além dos compósitos tradicionais para pás de turbinas eólicas (fibras de vidro/compósitos de matriz epóxi), são discutidos compósitos naturais, híbridos e nanoengenharia.

Escolheu-se o polipropileno nesta pesquisa para realizar os ensaios, tendo em vista que este polímero pode ser utilizado como matriz para a fabricação dos compósitos que constituem uma pá de turbina eólica. Observamos neste contexto a necessidade de propor um método e buscar identificar as suas potencialidades e limitações de modo experimental. Neste trabalho buscou-se apresentar uma técnica alternativa que leva em consideração o comportamento térmico do processo de resfriamento, bem como o desenvolvimento do pós-processamento dos termogramas gerados nos experimentos.

2. MÉTODO DO ESTUDO

O material selecionado para os testes foi o polipropileno devido ao seu fator de incompatibilidade. Segundo GRYS (2012) este fator é um indicador adimensional limitado pelo intervalo de (-1, 1) e seu valor absoluto e sinal caracterizam o grau e a característica da diferença térmica entre dois materiais, respectivamente.

Figura 2: Dimensão e profundidade das falhas nas amostras A1, A2, A3, A4, A5 e A6.



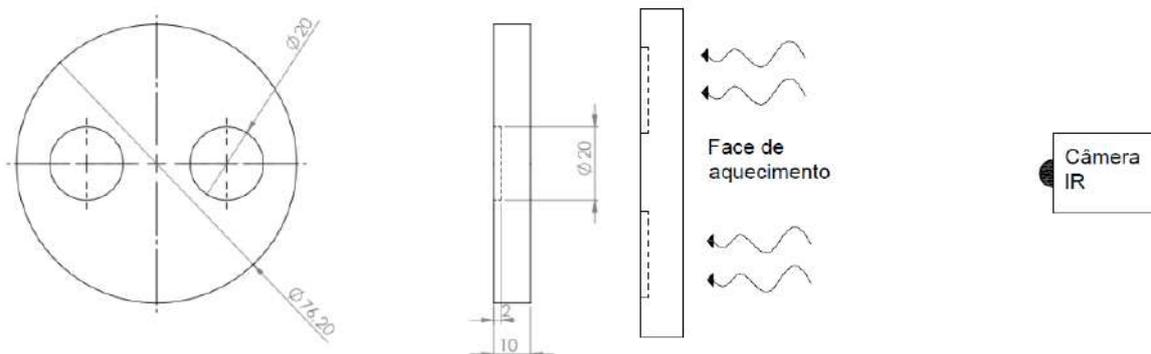
O polímero selecionado possui um fator de incompatibilidade térmica próximo a -1 quando comparado com o ar, material da falha. Escolheu-se o cilindro como o formato das amostras porque a geometria proporciona simplicidade na análise dos dados. A face lisa, sem falhas, é a que entra em contato com a fonte térmica, a distância da superfície para a falha são 8, 6, e 4 mm, respectivamente. A capacidade da termografia ativa identificar uma falha depende da razão entre o diâmetro e a profundidade que deve ser maior que 2. A tabela 1 apresenta esta relação. É possível notar que os corpos de provas A4 e A5 apresentam valores abaixo do esperado.

Tabela 1: Capacidade de visualização do defeito em função do diâmetro e da profundidade da falha.

Corpo de prova	Diâmetro	Profundidade	$\frac{\text{Diâmetro}}{\text{Profundidade}} > 2$
A1	20	8	2,5
A2	20	6	3,3
A3	20	4	5
A4	10	8	1,25
A5	10	6	1,67
A6	10	4	2,5

Escolheu a amostra A1 para apresentar os detalhes do formato na Figura 3. Inseriu-se dois furos no fundo da amostra para simular a presença das falhas. Ambos têm o formato de cilindro oco de 20 mm de diâmetro e estão localizadas com profundidades expressas na figura 2.

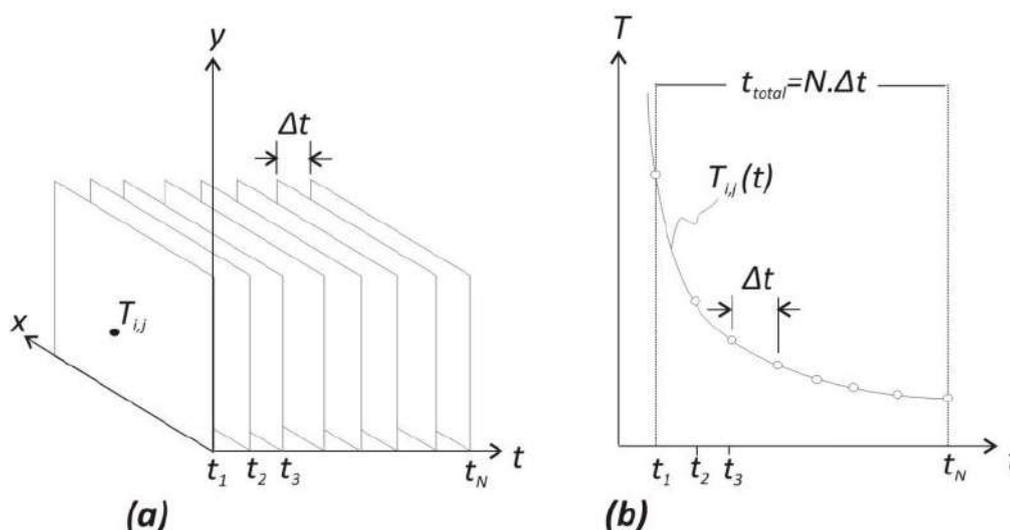
Figura 3: Dimensões da amostra A1 e face de aquecimento.



Um sistema termográfico foi usado para observar a superfície frontal sendo excitado com fonte térmica externa, apresentado na figura 4. O polipropileno é um material translúcido e para garantir condições satisfatórias da inspeção infravermelha, a superfície testada foi coberta com tinta preta fosca de alta emissividade ($\epsilon > 0.9$). O material testado foi aquecido por contato utilizando uma superfície aquecida por resistência elétrica de 13,5 ohms e tensão alternada de 50V. A superfície da fonte térmica foi montada sobre suporte de madeira nivelado simetricamente em ambos os lados, resultando em um nível adequado para que a amostra seja colocada sobre a superfície e obtenha uma condução/convecção térmica o mais homogênea possível entre as superfícies (fonte térmica/amostra sob análise).

O sistema de termovisão consiste de uma câmera térmica FLIR T420 IR e foi utilizado a interface GUI Flir Atlas SDK for MATLAB para conectar a câmera a um computador e gravar a sequência do termograma em tempo real. O tipo de detector da câmera é matriz plano focal (FPA) microbolômetro não refrigerado 320 x 240 pixels. A distância entre a câmera e o objeto foi fixada em 0,4 m (menor distância focal da lente utilizada). Uma sequência de termogramas foi registrada com uma taxa de 30fps (frames por segundo) durante 300s. Para extrair do vídeo a matriz foi usado Flir Atlas SDK for MATLAB resultando em uma matriz com a dimensão de 320x240x9000 formato *double*. A Figura 4 apresenta a estrutura dos dados em 3D (a) e a curva de resfriamento da temperatura por pixel (b).

Figura 4: Estrutura dos dados. (a) Matriz 3D de temperatura no domínio do tempo e (b) curva de decaimento da temperatura de um pixel com/sem defeito em coordenadas (i,j)



Fonte: RODRIGUES, 2010.

2.1 PROCESSAMENTO DO TERMOGRAMA

Durante o processamento do sinal foram utilizados a interface gráfica desenvolvida por (FREITA, 2018) e as funções do MATLAB GUI (*graphic user interfaces*), além de aplicar o algoritmo desenvolvido por SILVA *et al.* (2020). Estas ferramentas possibilitaram durante as análises visualizar os termogramas e localizar as áreas defeituosas visualmente (Figura 5), verificar contraste entre as curvas de resfriamento pelo tempo e calcular o desvio padrão da temperatura máxima (Figura 6), plotar as imagens em 3D (Figura 7), identificar as linhas de contorno da área de interesse e das falhas (Figura 8), entre outras funções.

Figura 5: Imagem térmica frame 1000 na paleta *Rainbow* do A2.

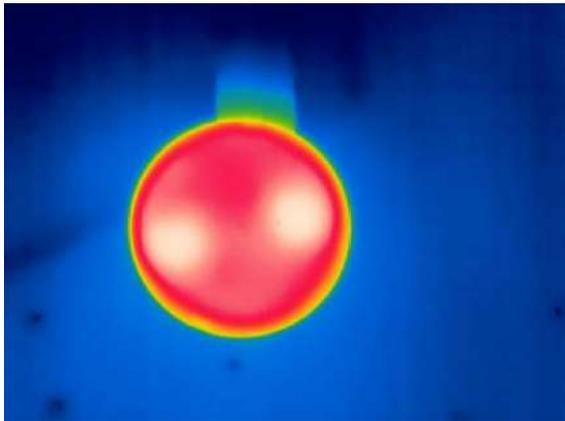


Figura 7: Função *mesh* do MATLAB do frame 1000 da imagem térmica normalizada.

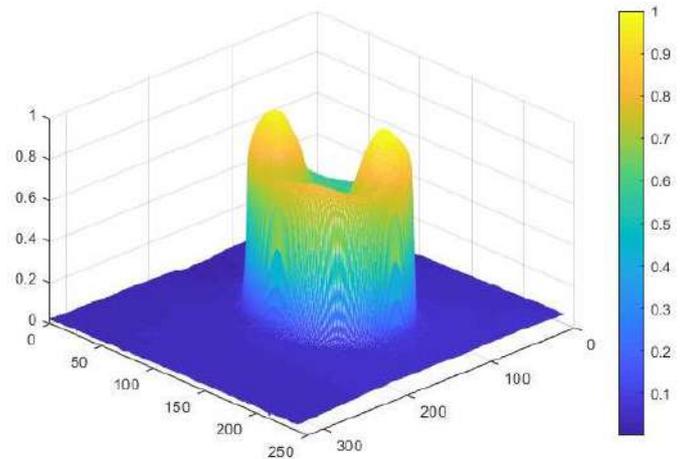


Figura 6: Curva de decaimento do pixel com a temperatura máxima e desvio padrão.

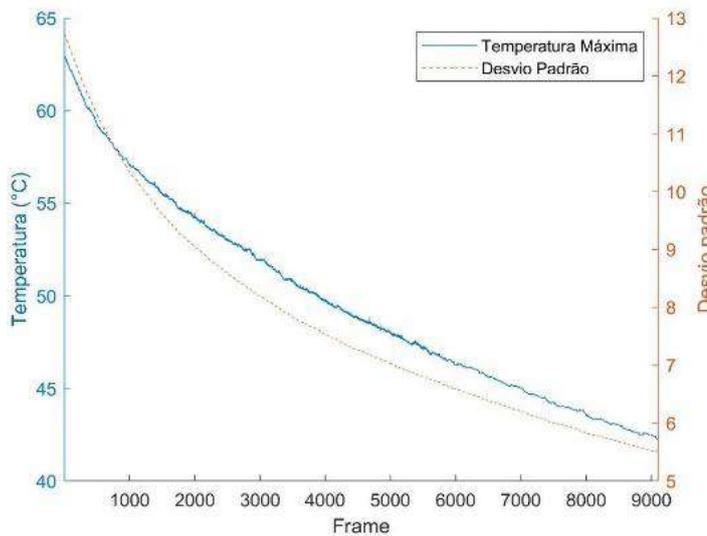
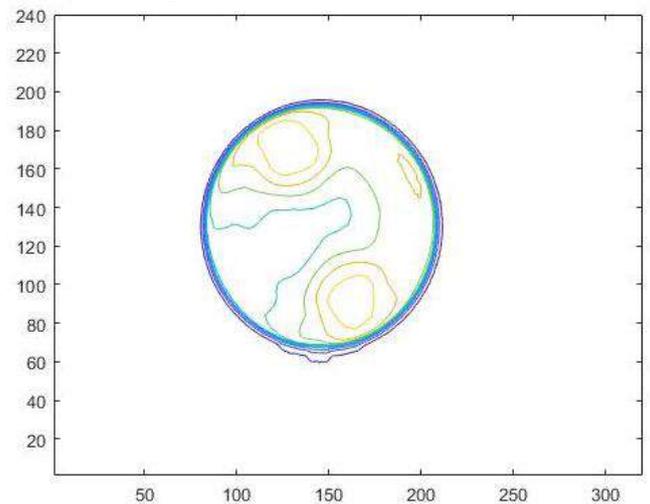


Figura 8: Linhas de contorno.



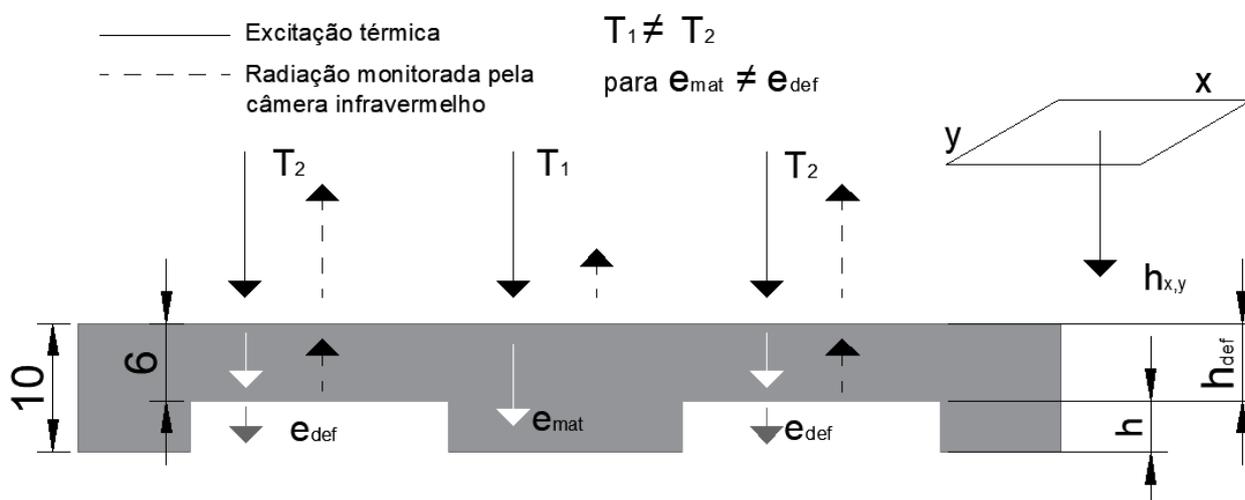
2.2 EFUSIVIDADE

A termografia ativa pode ser eficaz apenas se os parâmetros térmicos de material e defeito diferem consideravelmente. A efusividade térmica, caracteriza a quantidade de energia que o material é capaz de absorver e conecta três outros parâmetros, de acordo com a seguinte equação:

$$e = \sqrt[2]{k \cdot \rho \cdot c_p} \quad (1)$$

Onde: e - efusividade (J/(m².K.s^{1/2}); k - condutividade térmica (W/mK); ρ - densidade (kg/m³); c_p - Calor específico (KJ/Kg)

Figura 7: Diagrama da estrutura dos dois materiais, h_{def} é a profundidade do defeito em relação a superfície de análise e h é a profundidade do defeito.



Considerando a eq. 1 calculamos a efusividade e os resultados estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros físicos e térmicos.

Parâmetros	Polipropileno	Poliamida	Ar
Densidade (kg/m ³)	900	1130	1,2754
Condutividade (W/mK)	0,21	0,23	0,03
Calor específico (J/kg)	1930	1700	1012
Efusividade (J/m ² Ks ^{1/2})	603,96	664,7	6,22

2.3 FATOR DE INCOMPATIBILIDADE TÉRMICA

O fator de incompatibilidade térmica (FIT) entre o material e o ar (material do defeito) pode ser calculado utilizando a seguinte equação:

$$\Gamma = \frac{e_{ar} - e_{mat}}{e_{ar} + e_{mat}} \quad (2)$$

Onde: e_{ar} - efusividade do ar; e_{mat} - efusividade do material; Γ - Fator de incompatibilidade térmica

Para o polipropileno encontramos o valor de -0,9796 e para a poliamida o valor de -0,9815, ambos aproximam de -1 que indica uma alta capacidade de indicação da diferença térmica entre as áreas com defeito e sem defeito. Abaixo, apresenta-se a tabela 3 que determina as características do fator Gama aplicado à termografia ativa. Este fator é importante para definir se as condições das falhas são sensíveis à técnica. Podemos verificar se o fator de incompatibilidade for muito próximo de zero a capacidade da termografia detectar o defeito é impossível. Evidente, pois as diferentes características entre a falha e o material de análise que produz diferença na efusividade térmica produzida.

Tabela 3 – Fator de incompatibilidade térmica (Gama) e significado nos ensaios por termografia ativa.

Γ	Característica	Defeito é _____ em relação ao material testado	Contraste térmico entre região com e sem defeito	Detectibilidade do defeito por termografia ativa
-1	Alto	Bom isolador térmico	Rápido	Alto
-0,1	Baixo	Ruim isolador térmico	Lento	Baixo
0	Não há	O mesmo	Não há	Impossível
0,1	Baixo	Ruim condutor térmico	Lento	Baixo
1	Alto	Bom condutor térmico	Rápido	Alto

2.4 CONTRASTE TÉRMICO PADRÃO

O método de impulso longo tem muitas aplicações, como determinação de espessura de revestimentos, inspeção das ligações revestimento-substrato, avaliação de estruturas compostas, medições de condutividade térmica dos materiais. No experimento foram analisados apenas os termogramas da fase de resfriamento capturadas após a excitação térmica por fonte externa por contato. A detecção de defeitos é um processamento básico aplicando o contraste térmico padrão (CTP) [GRYS, 2012] utilizando a equação abaixo.

$$CTP_{x,y}(t) = \frac{T_{x,y}(t) - T_{x,y}(t_0)}{T_{semfalha}(t) - T_{semfalha}(t_0)} \quad (3)$$

Onde: $T_{x,y}(t)$ - Imagem no tempo t ; $T_{x,y}(t_0)$ - Imagem de referência no t_0 ; $T_{semfalha}(t)$ - Pixel sem falha no tempo t ; $T_{semfalha}(t_0)$ - Pixel sem falha de referência em t_0 ;

A equação (3) apresentada que calcula o CTP representado pela razão entre a diferença de um frame em análise com relação a um frame de referência e a diferença entre pixels ao longo do tempo sem falha. Encontramos os resultados a seguir para as três profundidades e observando os resultados apresentados na Figura 8 apresenta que o CTP para a profundidade de 8mm da falha em relação a superfície foi a que mais apresentou ruído, devido a difusividade térmica lateral e pelo fato da falha possuir apenas 2mm de profundidade como esperado devido ao fator da Tabela 1 ser próximo de 2. A Figura 9 apresenta a distribuição normal de uma região com defeito.

Figura 8: Resultados em 3D do contraste térmico considerando as três profundidades (4, 6 e 8).

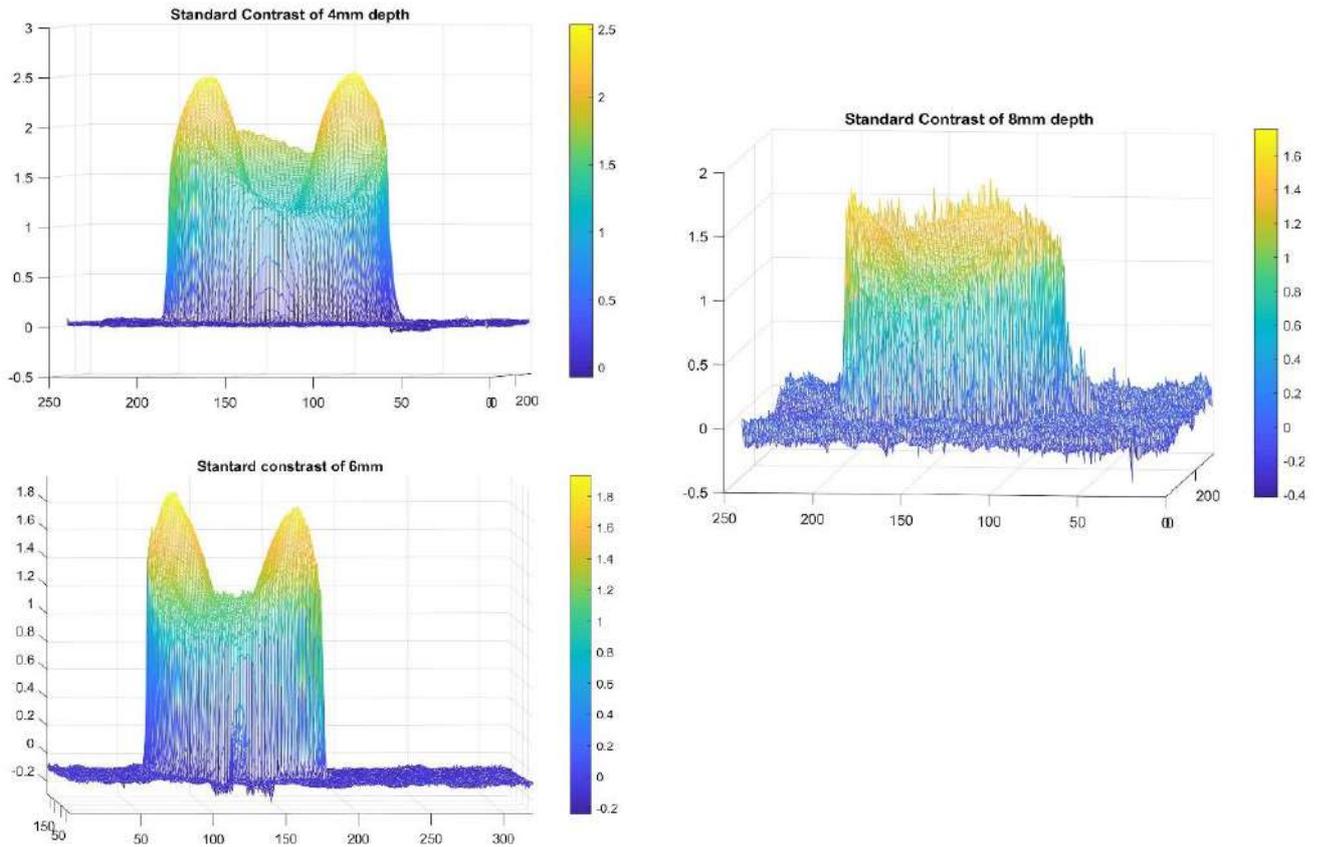
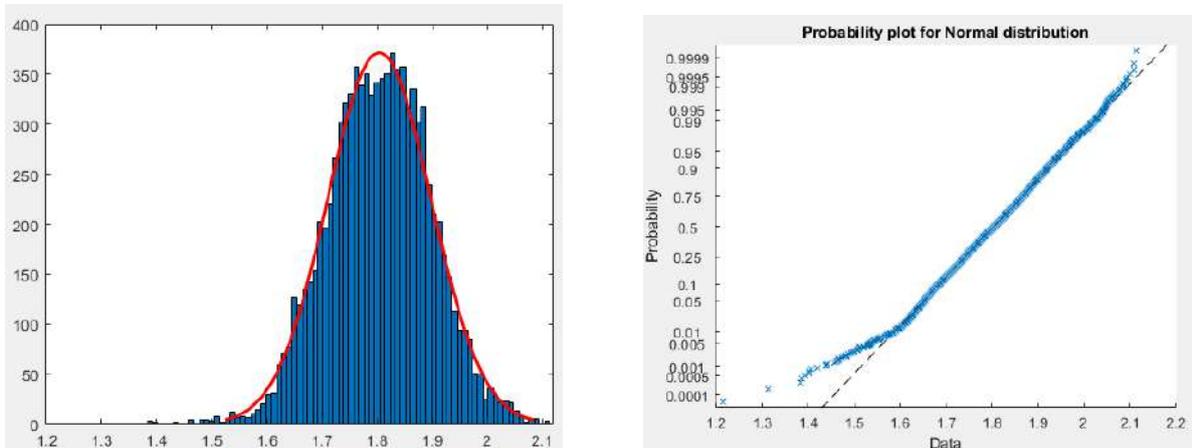


Figura 9: Distribuição normal do pixel máximo.



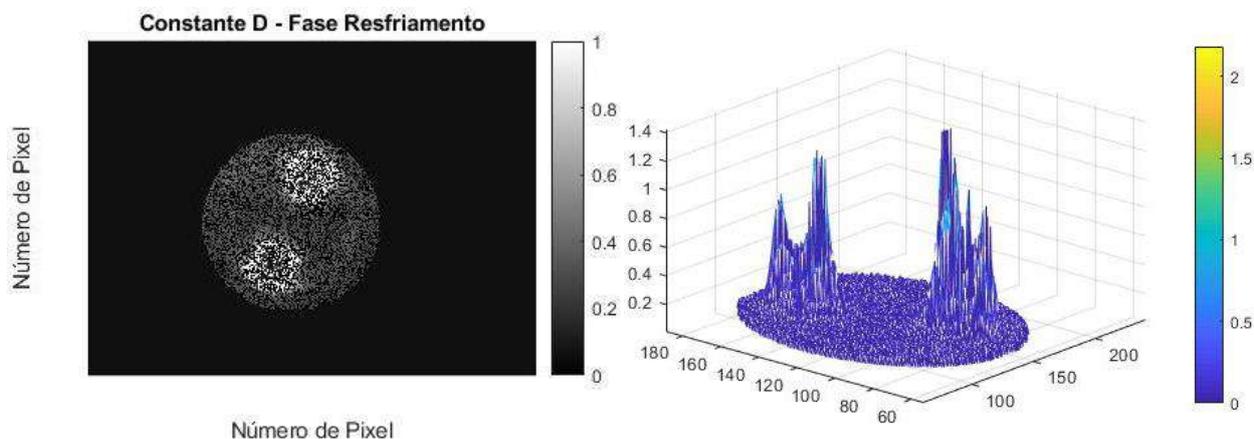
2.5 COMPRESSÃO UTILIZANDO O MODELO DE RESFRIAMENTO

Devido ao gigantesco volume de dados, uma etapa importante no processamento é a redução sem perda de informação. SILVA *et al.* (2022) desenvolveu um modelo de compressão utilizado para reduzir a dimensão dos dados em até 98% utilizando a equação (4) como modelo para o ajuste de resfriamento elaborado especificamente para análise da curva de resfriamento de sinais radiométricos para a faixa do baixo e médio infravermelho.

$$y = a \cdot e^{-b \cdot t} + c \cdot e^{-d \cdot t} \quad (4)$$

São calculados os quatro parâmetros (a, b, c e d) por regressão não linear de Gauss-Newton. O sinal de temperatura de cada pixel é normalizado, onde os dados e a curva ajustada pela equação 1 calculam o sinal normalizado ao longo do tempo. Antes de ajustá-los, foi aplicado o filtro da mediana para eliminar algum ruído (alta frequência) e facilitar o ajuste, tornando a convergência mais rápida. A figura 9 apresenta o resultado da constante de resfriamento 'd' em 2D com a exclusão do fundo e apenas os dados relevantes para análise. Ao lado apresenta-se a constante em 3D evidenciando as regiões com falhas.

Figura 9: Constante de fase de resfriamento 'd'.



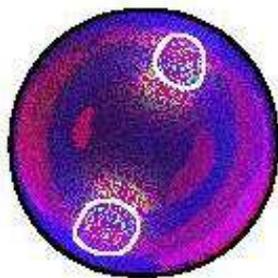
É importante salientar o significado físico do ajuste aplicado do modelo utilizado considerando as restrições do fenômeno físico, portanto, seguindo as leis de transferência de calor e termodinâmica. É possível verificar a similaridade entre as teorias de Newton Lei do resfriamento na Eq. 5 e o ajuste com a soma de o modelo exponencial na Eq. 4:

$$T = T_a + (T_0 - T_a) \cdot e^{\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)} \quad (5)$$

2.6 IMAGEM RESULTANTE

O método da imagem resultante sugerido por SILVA *et al.* (2022) possui a finalidade de entregar ao operador e mantenedor uma única imagem capaz de sintetizar todas as regiões importantes para identificação de falhas internas. Mediante um simples entendimento dos conceitos físicos envolvidos se espera converter a análise de uma única imagem em um processo rápido e que entregue agilidade no processo de tomada de decisão.

Figura 10: Resultado final atribuindo os indicadores em cada canal RGB.



Calculou-se segundo NETO *et al.* (2020) os 3 indicadores que representam sinais de entrada para os canais RGB da imagem resultante: o Máximo contraste, a Variação máxima de cada pixel ($\Delta T_{\text{máx}}$) e a constante de tempo. O resultado está exposto na figura 10. Importante ressaltar que o fundo da imagem térmica foi excluído utilizando a técnica do limiar de Otsu que a partir de um valor de *threshold* deletamos dados abaixo desse valor ajustado e mantemos apenas os dados acima, mantendo apenas a região de interesse para minimizar a quantidade de dados e atingir um processamento dos dados mais rápido.

6. CONCLUSÃO

O trabalho proposto objetivou analisar e processar os dados gerados pelo método de termografia ativa com aquecimento de pulso longo. Buscando aplicar em pás de aerogeradores, pode-se indicar a capacidade da técnica em verificar falhas como deslocamento da pele já que esta se dá de forma próxima da superfície, rachaduras internas, e descolamento das junções. Além de evidenciar a espessura das camadas superior e inferior das pás onde as falhas possuem alta capacidade de identificação por termografia ativa.

O crescimento dos END no setor requer aprimoramento das pesquisas e da forma de processamento dos dados. Quanto mais estudos temos sobre esta técnica maior a probabilidade de elaboração de normas técnicas e padronizações. É muito importante conhecer os limites e as características de cada técnica para que sejam assertivas as escolhas em função do tipo de falhas que se deseja identificar. O pós-processamento dos sinais termográficos permitiu identificar regiões com defeitos em função do diâmetro e profundidade da falha em relação à superfície de análise. As etapas de pré-processamento aplicadas foram o filtro mediana, exclusão do fundo da imagem pelo limiar de Otsu e identificação das bordas são essenciais para que a etapa de pós-processamento seja aplicada e parâmetros das condições da imagem sejam obtidas.

O indicador utilizado para verificação da utilização da END foi o fator de incompatibilidade térmica que para calcular necessita da efusividade do material da peça e da falha. Este fator indica a detectabilidade do defeito. Os resultados foram constatados experimentalmente e apresentaram respostas condizentes com o esperado pelo estado da arte. O contraste térmico padrão apresentou como a profundidade da falha influência na análise dos dados obtidos. Observou-se que a profundidade de 8mm gerou muito ruído e não evidenciou a falha, enquanto que para as profundidades de 4 e 6 as falhas foram claramente identificadas. Foi possível verificar a distribuição normal de uma região com defeito indicado pelo pixel máximo. Utilizou-se o algoritmo desenvolvido por SILVA *et al.* (2020) para modelar a curva de resfriamento de cada pixel baseado na Lei de Resfriamento de Newton.

Os experimentos permitiram testar e validar os estágios de pós-processamento. Utilizou-se algumas ferramentas para desenvolvimento do pós-processamento, a função *mesh* do MATLAB para plotar em 3D a imagem térmica por frame, a função *contour* que define as linhas de contorno da imagem térmica, os dados no tempo pixel-a-pixel através da seleção do ponto máximo de um frame, bem como a seleção de pontos com defeito ou sem defeito na região de interesse mediante a visualização com a paleta de cor

rainbow. Aplicou-se aos dados o processo de compressão, muito importante quando estamos tratando de análise de imagens, principalmente porque minimiza o tempo de processamento.

Com as informações importantes evidenciadas, três indicadores foram calculados para gerar a imagem resultante: Máximo contraste, Variação máxima de cada pixel ($\Delta T_{\text{máx}}$) e Constante de tempo. Esta pesquisa apresenta o processamento dos dados obtidos a partir da termografia ativa e sugere ensaios das condições de funcionamento das pás de aerogeradores de pequeno porte. O próximo passo é submeter estruturas de pás com falhas artificialmente inseridas para aplicação do método.

Este trabalho é fruto de estudos no Laboratório de Engenharia e Energia (LABENGE) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) localizado no departamento de Engenharia Mecânica. Obteve apoio através da Fundação de Apoio à Pesquisa e à Inovação do Estado de Sergipe (FAPITEC). E é um pequeno fragmento do trabalho de dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da autora com ênfase em processamento de sinais termográficos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JOSHUVA, A. D., **Fault Diagnosis and Localization of Wind Turbine Blade**, Vellore Institute of Technology - VIT, Índia, 2018.

MÁRQUEZ, F. P. G., CHACÓN, A. M. P. **A review of non-destructive testing on wind turbines blades**, Renewable Energy, Volume 161, 2020, Pages 998-1010, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.145>.

JENSEN, F., TERLAU, M., SORG, M., FISCHER, A. **Active Thermography for the Detection of Sub-Surface Defects on a Curved and Coated GFRP-Structure**. Appl. Sci. 2021, 11, 9545. <https://doi.org/10.3390/app11209545>.

NETO, J. J. de O., SILVA, T. S., SILVA, W. F. e RIFFEL, D. B., **TÉCNICA DE DETECÇÃO DE FALHAS EM CÉLULAS FOTOVOLTAICAS POR TERMOGRAFIA ATIVA**, VIII congresso brasileiro de energia solar, Fortaleza, 2020.

FREITAS, J. P. O., **DESENVOLVIMENTO DE UMA INTERFACE GRÁFICA PARA OBTENÇÃO E ANÁLISE DE VÍDEOS TÉRMICOS**, TCC de Engenharia Mecânica, UFS, São Cristóvão, 2018.

MALDAGUE, X., MOORE, P. O., **Nondestructive Testing Handbook: Infrared and Thermal Testing**. 3 ed. ASNT (American Society for Nondestructive Testing), 2001.

RODRÍGUEZ, F. DE J. L., **Detecção de defeitos em materiais cerâmicos usando termografia**, Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2010. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/94002>.

SILVA, V. M. A. **TERMOGRAFIA ATIVA PULSADA APLICADA A JUNTAS COMPÓSITAS LAMINADAS**, Projeto de Graduação, UFRJ, Escola Politécnica, 2014.

ABOUHNIK, A.; ALBARBAR, A., **WIND TURBINE BLADES CONDITION ASSESSMENT BASED ON VIBRATION MEASUREMENT AND LEVEL OF AN EMPIRICALLY DECOMPOSED FEATURE**. Energy Conversion and Management, 64(), 606–613. doi:10.1016/j.enconman.2012.06.008, 2012.

MISHNAEVSKY, L., BRANNER, K., PETERSEN, H. N., BEAUSON J., MCGUGAN, M., SORENSEN, B. F. **MATERIAL FOR WIND TURBINE BLADES: AN OVERVIEW**. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>, 2017.

SILVA, W. F., MELO, R. A. C., GROSSO, M., PEREIRA, G. R. e RIFFEL, D. B., **ACTIVE THERMOGRAPHY DATA-PROCESSING ALGORITHM FOR NONDESTRUCTIVE TESTING OF MATERIALS**, IEEE Acesso, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3025329.

CHEN, X., ZHAO, W., LU ZHAO, X., XU, J. Z., **Preliminary failure investigation of a 52.3m glass/epoxy composite wind turbine blade**, ELSEVIER, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.05.024>doi: 2014.

WILBERFORCE, T., OLABI, A.G., SAYED, E. T., ALALMI, A. H., ABDELKAREEM, M. A., **Wind turbine concepts for domestic wind power generation at low wind quality sites**, Journal of Cleaner Production, Volume 394, 2023, 136137, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136137>.

GERAÇÃO HÍBRIDA COMO ALTERNATIVA PARA MITIGAR IMPACTOS DA MASSIVA INSERÇÃO DE GERAÇÃO RENOVÁVEL NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

Violeta Fonseca Lino¹

Doutora em Engenharia Civil – Área de Planejamento Energético e Sistemas Elétrico

Instituição: Gerente de Projetos de Due Diligence no Grupo Energia

E-mail: violetalino@hotmail.com

Luis Henrique Lancellotti Zapparoli Pupin²

Engenheiro Civil, Pós-graduado em Energias Renováveis

Instituição: Coordenador de Due Diligence no Grupo Energia

E-mail: luishenrique.pupin@gmail.com

Alberto Luiz Francato³

Professor Livre Docente da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

Instituição: Universidade Estadual de Campinas

E-mail: francato@fec.unicamp.br

RESUMO

É notório que não só o Brasil, mas o mundo vem passando por uma transformação em suas matrizes de energia elétrica, devido ao crescimento populacional e econômico, preocupações com o meio ambiente e, conseqüentemente, aumento da demanda energética. Especialmente no Brasil, que é o foco deste estudo, e onde a estrutura de geração de energia, desde sua reformulação nos anos 2000, foi desenvolvida e regulamentada baseada em uma geração hidráulica com complementação por usinas térmicas. Nos últimos dez anos, a evolução da matriz tem mostrado uma significativa participação de fontes renováveis intermitentes e/ou sazonais como a energia eólica, solar e térmica a partir de biomassa, é perceptível os novos desafios tanto no planejamento quanto na operação do sistema, uma vez que o Brasil possui um sistema todo interligado, de grandes extensões geográficas e diferentes condições climáticas. Portanto este artigo apresenta e propõe pontos de vista pouco difundidos na área de energia e que podem ter impactos significativos na matriz brasileira. A ampla inserção de fontes intermitentes, sem uma nova proposta que contemple as diversidades de oferta das fontes contínuas, pode minimizar os interesses em novos desenvolvimentos na geração de base, bem como tornar menos atrativa a operação das fontes hídricas, responsáveis por grande parte do SEB. Além de mitigar os riscos, o trabalho apresenta resultados extremamente positivos, não só em termos de Garantia Física, mas também de aspectos que podem ser levantados em uma operação híbrida em prol da confiabilidade do sistema e da segurança energética.

Palavras-chaves:

Intermitência, geração de energia híbrida, garantia física, segunda energética.

ABSTRACT

It is notable that not only Brazil, but the world is going through a transformation in their electrical energy matrices, due to population and economic growth, concerns about the environment and, consequently, energy demand increase. Especially in Brazil, which is the focus of this study and where the power generation structure, since its reformulation in the 2000s, has been developed and regulated to have a hydraulic generation base with complementation by thermal plants. In the last ten years, the matrix evolution has shown a significant participation of intermittent and/or seasonal renewable sources such as wind, solar and thermal energy from biomass, it has been noticed new challenges in the system planning and operation, which already has an intensive challenge once it is practically all wired interconnected, of great geographical dimensions and different climatic conditions. This paper presents and proposes points of view that are not very widespread in the energy field and that can have significant impacts on the Brazilian matrix. The wide insertion of intermittent sources, without a new proposal that includes the diversities of the continues sources supply, can minimize the interests in new developments in the base generation, as well as make the operation of hydro sources less attractive, which are responsible for a large part of the SEB. In addition to mitigate the risks, the paper presents extremely positive results, in terms of not only the Firm Energy, but also aspects that can be raised in a hybrid operation in favor of system reliability and energy security.

Keywords:

Capacity Credit, Hybrid power generation, Intermittency

1. INTRODUÇÃO

O Brasil que tradicionalmente apresentou uma base de geração renovável por contar com sua majoritária participação na geração hídrica, especialmente com grandes reservatórios para tratar questões de oscilações dos regimes pluviais, desenvolveu um sistema elétrico baseado na geração de energia hídrica com reservatórios, com complementariedade em usinas termoeletricas, conectadas a um sistema de transmissão interligado que possui abrangência nacional em quase toda sua totalidade – o Sistema Interligado Nacional (SIN), que vêm se transformando rapidamente nos últimos anos. Exemplos destas transformações ocorrem nas usinas hidrelétricas recentemente construídas que quase em sua totalidade são do tipo a fio d'água. Ou seja, nestas usinas não existe capacidade de armazenamento de água suficiente para promover regularização da vazão para geração, o que reduz a capacidade de fornecimento de energia constante nos meses mais secos do ano.

Somando-se a este fato e observando-se o crescimento eminente da geração eólica, principalmente na região nordeste, o Brasil, pela sua capacidade de geração e crescimento através de diversas fontes alternativas, segue sua transformação de um sistema elétrico que possuía sua essência baseada nas usinas hídricas com capacidade de regularização complementado por usinas térmicas, para um sistema com inserção cada vez maior de outras gerações renováveis (eólica e solar), com a utilização da capacidade regularizadora de seu sistema hídrico para suprir déficits das gerações intermitentes (IEMA,2016).

É notável que a inserção de fontes renováveis à matriz eletroenergética brasileira é benéfica e necessária para suprir a demanda contínua por energia, porém do outro lado é impreterível atentar-se aos possíveis impactos que este rápido crescimento pode acarretar ao SEB (Sistema Elétrico Brasileiro), uma vez que as energias renováveis, principalmente eólica e solar, são baseadas em recursos de características intermitentes e sazonais. Sendo assim é de extrema importância o correto planejamento desde o início dos projetos de expansão, com foco em minimizar tais impactos, e não somente após o início da operação, o que poderá ser um momento tardio.

2. CRESCIMENTO DA GERAÇÃO RENOVÁVEL NO BRASIL

Desde o período da Revolução Industrial, a energia possui grande influência no bem-estar social e na competitividade econômica dos países, que foram sucessivamente vencendo paradigmas e ganhando espaço tecnológico para a crescente utilização de combustíveis fósseis. Onde é interessante verificar que 80% da demanda energética no ano de 2014 foi suprida por carvão, petróleo e gás natural (IEA, 2016).

Em busca de novas alternativas e fontes de energia limpa a custos menores, o Brasil juntamente com o mundo, teceu seu caminho no crescimento da disponibilidade energética. Toda a evolução da indústria e economia, juntamente com questões de âmbito ambiental culminaram nos avanços tecnológicos de recursos energéticos limpos e renováveis, tornando-os prioridade na expansão da matriz elétrica. Desde 2012, o acréscimo de capacidade instalada de geração renovável superou a implantação da geração não renovável. Em 2021 a energia renovável gerada ultrapassou a marca de 3.064 GW em capacidade instalada, representando 38% do montante mundial (IRENA, 2021).

A hidroeletricidade se tornou, há décadas, essencial na geração de eletricidade no SEB, devido ao seu protagonismo econômico e a vasta disponibilidade dessa fonte de energia. O Brasil desfruta de um parque de geração elétrica com cerca de 181,6 GW de capacidade instalada, principalmente hidrelétrica (EPE, 2022). O SEB é constituído majoritariamente por fontes renováveis existindo a relevância para geração hídrica, que corresponde a 60,2% da oferta interna total, enquanto 2,6% possuem origem solar e 11,4% em energia eólica. (EPE, 2022).

As Figuras 1 e 2 demonstram a rápida transformação e evolução de fontes de energia elétrica, que apesar de continuarem predominantemente hídrica, já tem seu papel sendo abordado por outras fontes de energia renovável.

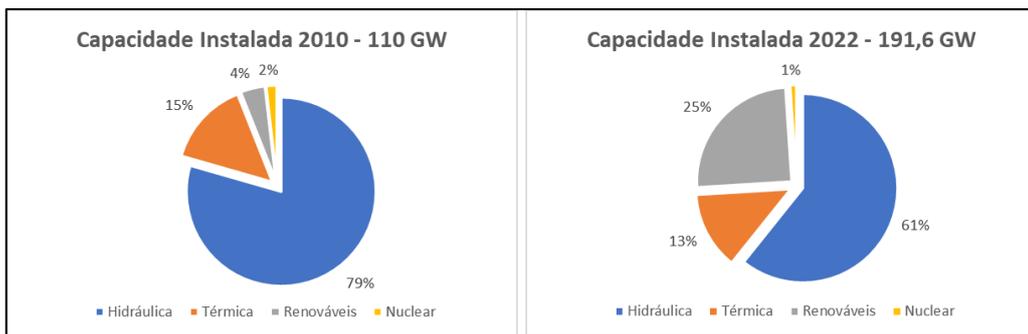


Figura 1: Capacidade Instalada 2010
Fonte EPE 2010

Figura 2: Capacidade Instalada 2022
Fonte CCEE 2023

A geração de energia proveniente de usinas eólicas atingiu 81,6 TWh em 2022, correspondendo a aproximadamente 26 GW de capacidade instalada e a uma expansão de 14,9%, já a produção de geração solar atingiu 30,1 TWh considerando tanto a geração centralizada como a distribuída, representando um avanço de 79,1% em relação ao ano anterior em ambos os casos (BEN 2023) (EPE, 2023) (CCEE, 2023).

Segundo o Plano da Operação Energética – PEN, 2010/2024 (ONS, 2022), pode-se observar que a previsão da potência instalada brasileira até 2024 e que os investimentos do setor elétrico são focados em geração eólica e solar. A EARmáx (energia armazenada máxima hídrica) do SIN permanece inalterada de 2010 a 2024, isso porque a expansão hidrelétrica neste período é dada por usinas com pouco ou níveis inexistentes de regularização, ou seja, usinas a fio d’água. Além disso, é importante ressaltar que o SIN possui uma das maiores capacidades de armazenamento do mundo.

Neste contexto, o Brasil possui peculiaridades interessantes e únicas por já contar com uma matriz energética renovável ampla quando comparada à média mundial. Embora fontes tradicionais de energia renovável (biomassa e hidrelétrica) estejam fortemente presentes no SEB, a introdução da geração eólica e solar vem alterando as características da produção de energia nacional. Pois variações pertinentes dos recursos hídricos e de biomassa se sucedem em longos períodos (sazonais e anuais), enquanto as fontes

alternativas de geração (eólica e solar) apresentam grandes variações em períodos muito curtos (intradiária).

Segundo Hallack (2017) e Losekann (2013), a matriz eletroenergética brasileira possui privilégios para adaptação a uma inserção maciça de fontes intermitentes, como a energia eólica e solar, podendo ser pontuado como um sistema dinâmico, que permite ajustes necessários a esta expansão. Porém é necessário levar em consideração que: i) o sistema dispõe de uma alta flexibilidade devido a predominância hidráulica, contanto com 61% da capacidade instalada; ii) a capacidade máxima potencial de armazenagem dos reservatórios de 291 GW/mês, equivale a uma carga anual de aproximadamente cinco meses de geração; e iii) o sistema de transmissão do SIN, atende através de seu intercâmbio elétrico-energético, 98% da demanda nacional.

Portanto para o Brasil, os próximos anos podem apresentar desafios e oportunidades, uma vez que dispõe de muitos recursos energéticos e tecnologia para galgar mais espaço no quesito da energia renovável, mas que exigirá inovações e ajustes regulatórios para incluir as oscilações sistêmicas advindas das fontes de energia solar e eólica e ainda assim garantir seu alto nível de segurança e sustentabilidade energética.

Neste sentido a indústria eólica mundial apresenta uma evolução tecnológica relacionada a componentes e aerogeradores com unidades geradoras cada vez mais potentes e maiores. Dados recentes evidenciam que a China possui com sua nova turbina MySE 16.0-242 capacidade de gerar 16MW de potência a partir de um rotor com incríveis 242 metros de diâmetro, atualmente a maior unidade geradora eólica do mundo desenvolvida pelo Mingyang Smart Energy Group (MINGYANG SMART ENERGY, 2021).

A Figura 3 ilustra a evolução e projeção das torres eólicas e suas diferentes características construtivas, tais como, diâmetro, potência e altura e nos mostra que o “futuro” já chegou, caminhando cada vez mais rumo às novas tecnologias.

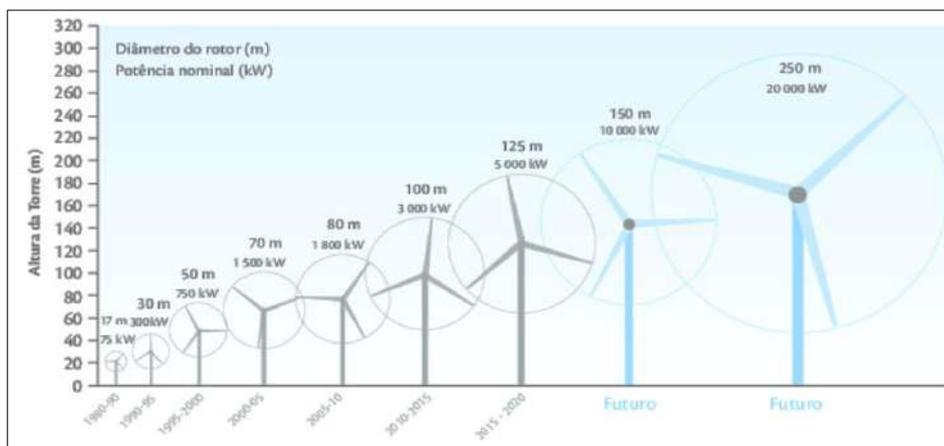


Figura 3: Evolução de características de turbogeradores eólicos.

Fonte: CGE (2015)

3. IMPACTOS DA INSERÇÃO DA GERAÇÃO RENOVÁVEL

Como visto anteriormente, a massiva inserção de fontes renováveis no SEB já é uma realidade. Atualmente já se usufrui dos benefícios pelo crescimento destas fontes de geração através de custos mais baixos da energia elétrica, isto graças ao nível de exportação de energia do sistema Nordeste para o Sudeste-Centro Oeste durante o último ano no período considerado crítico para o sistema hídrico, somando-se a isso níveis pluviométricos elevados, resultado assim em um menor consumo dos reservatórios e aumentando a segurança energética do sistema, minimizando eventuais “erros” do planejamento do ONS (Operador Nacional do Sistema).

Em contrapartida, o aumento excessivo destas fontes sem uma mínima análise de riscos e impactos na matriz pode causar danos futuros como interrupção do fornecimento de energia. Isto pode ser motivado

através de uma fraca estrutura de geração de base ou de um sistema predominantemente intermitente, não agregando segurança ao SEB. A seguir é apresentado um estudo de caso realizado na cidade chinesa Jiaying que possuía uma significativa capacidade instalada de geração, mas índices baixos de Garantia Física (*capacity credit* em inglês), colocando assim em questão a segurança do seu sistema energético.

As garantias físicas visam promover credibilidade e confiabilidade aos sistemas eletroenergéticos além de proporcionar a remuneração dos gerados. Neste caso, quanto maior a garantia física de um sistema, maior sua segurança energética.

Keping Zhu, 2021 apresenta um estudo para a cidade chinesa Jiaying e expõe uma matriz energética predominante térmica e nuclear conforme Figura 4. Foram obtidos dados de temperatura e radiação solar do Distrito de Pinghu, Jianxing em 2020. Os dados horários de velocidade de vento foram coletados em Shengsi Islands, ilha próxima à cidade de Jianxing, sendo obtidos um total de 8.784 horas de estudo.

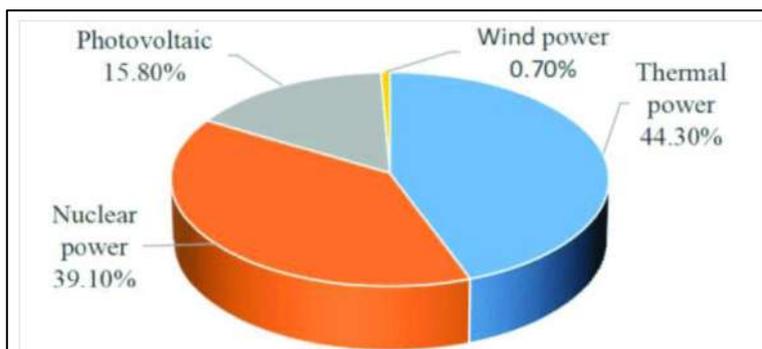


Figura 4: Matriz energética da cidade de Jianxing, China.
Fonte: Keping Zhu, 2021

As análises realizadas pelo modelo proposto por Keping Zhu, 2021, levam à uma conclusão com relação ao impacto das inserções de geração por fontes fotovoltaicas e eólica na garantia física da matriz energética da cidade de Jianxing.

As Figuras 5 e 6 tem como propósito demonstrar a análise realizada com a inserção de usinas eólicas, onde a mesma foi realizada com base em uma capacidade instalada variável de 20MW a 2000MW onde foi observado o comportamento referente à queda da Garantia Física enquanto aumentavam os valores de capacidade instalada.

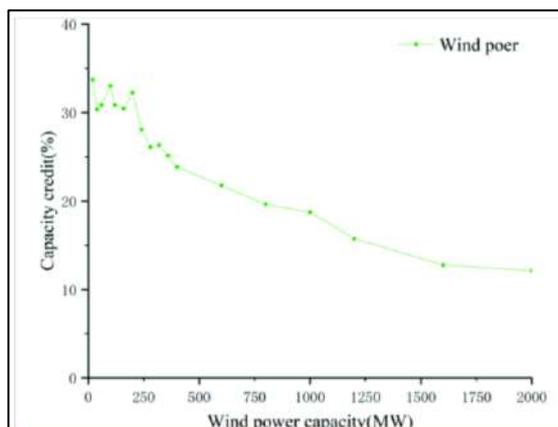


Figura 5: Correlação de impacto na Garantia Física conforme capacidade instalada
Fonte: Keping Zhu, 2021

Units	Wind power (MW)	Capacity value (MW)	Capacity credit (%)	Penetration power level (%)
5	20	6.7422	33.71%	0.59%
10	40	12.1455	30.36%	1.18%
15	60	18.5035	30.84%	1.76%
25	100	32.9922	32.99%	2.94%
30	120	37.0105	30.84%	3.53%
40	160	48.7089	30.44%	4.71%
50	200	64.5047	32.25%	5.88%
60	240	67.3901	28.08%	7.06%
70	280	73.1096	26.11%	8.24%
80	320	84.2404	26.33%	9.41%
90	360	90.4616	25.13%	10.59%
100	400	95.4177	23.85%	11.76%
150	600	130.6302	21.77%	17.65%
200	800	157.1535	19.64%	23.53%
250	1000	187.3636	18.74%	29.41%
300	1200	189.0767	15.76%	35.29%
400	1600	204.2463	12.77%	47.06%
500	2000	242.5866	12.13%	58.82%

Figura 6: Análise de impacto na Garantia física conforme capacidade instalada e índice de penetração
Fonte: Keping Zhu, 2021

Para uma análise comparativa entre a inserção da geração fotovoltaica e eólica na cidade de Jianxing, na Figura 7 observa-se que no mesmo índice de capacidade instalada, a Garantia Física da usina fotovoltaica é aproximadamente 5% maior quando comparada à usina eólica. Isto se deve muito pelo fato da cidade de Jianxing ser desenvolvida e ser afetada principalmente por áreas industriais e residenciais, fazendo com que sua carga máxima geralmente seja verificada em torno do meio-dia, coincidindo com o período de uma maior geração e Garantia física no horário de geração fotovoltaica.

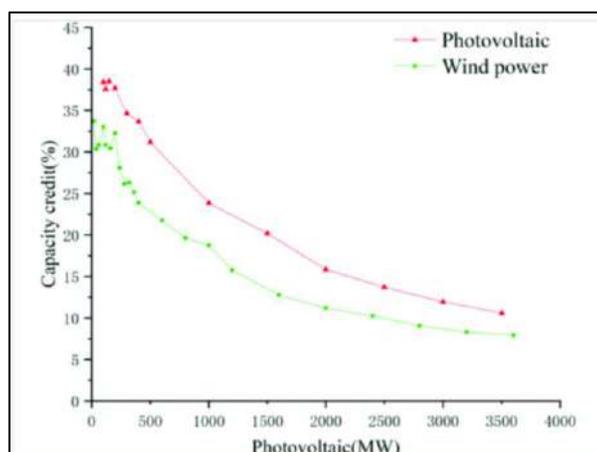


Figura 7: Análise comparativa de capacidade firme fotovoltaica e eólica conforme aumento da capacidade instalada
 Fonte: Keping Zhu, 2021

Independente da comparação fotovoltaica com eólica, observa-se um crescimento acelerado de fontes renováveis de maneira não criteriosa, sem avaliar o impacto na Garantia Física do sistema em questão, podendo levar a conclusões precipitadas e falhas ao objetivar aumento da segurança energética deste mesmo sistema. Como visto no caso anterior, ao aumentar significativamente a capacidade instalada de tais fontes, o impacto positivo no sistema se torna mínimo, onde muitas vezes não é justificado o investimento financeiro.

A implantação de fontes renováveis de energia nos mercados resulta em implicações e reformas de política energética necessárias que, quando não planejadas antecipadamente podem gerar graves consequências. Segundo Sirin et. al., 2022, o mercado da Turquia já sofre há mais de 20 anos com as reestruturações, onde os geradores de combustíveis fósseis existentes são impactados por essa grande transformação por meio de dois mecanismos principais. Em primeiro lugar, devido à prioridade de despacho, garantias de compra oferecidas como parte dos programas de incentivo dos governos e seu baixo custo marginal, as fontes de energia renovável tendem a mudar suas curvas de oferta de eletricidade, forçando a produção de usinas marginais. Isso resulta no fator conhecido como ordem de mérito, que em alguns mercados geradores de combustíveis fósseis ocasionalmente apresentam lances negativos para permanecerem despachados durante o horário de pico. Em segundo lugar, as características de geração de usinas renováveis podem exacerbar a oscilação dos preços praticados pelo mercado atacadista e, portanto, elevar os riscos de preços e os custos de balanceamento do sistema.

Para Gurtler et al., 2019 países como a Espanha e República Tcheca, pioneiros na inovação de inserção de fontes renováveis na União Europeia, ainda sofrem o desmantelamento de suas políticas energéticas e mostram quão vulneráveis países podem se tornar pela falta de tais políticas energéticas adequadas.

Conclui-se desta forma que muitos casos internacionais podem servir como referência e lições aprendidas para a matriz brasileira, porém não devem ser consideradas como uma verdade absoluta visto que a base elétrica brasileira é composta por um grande percentual de geração hídrica distribuída em uma vasta extensão territorial com diferentes cenários climáticos e pluviais ao longo do tempo, característica singular

não percebida em outros países. Porém nota-se claramente que grandes potências mundiais investiram fortemente em usinas intermitentes sem se preocupar com a segurança energética de suas matrizes, problema este que pode ser considerado como lição aprendida pelo Brasil a fim de se pensar em uma possível reestruturação de seu sistema.

Apresentado os potenciais riscos e impactos na matriz energética, propõe-se análise cuidadosa para que se possa minimizar ou até mesmo mitigar tais riscos sem a necessidade de grandes investimentos em gerações consideradas como energia de base, onde no caso brasileiro resume-se a energia hídrica e térmica. Assim, o artigo em questão propõe-se a algumas alternativas que possam vir de encontro com tais necessidades, sem exaurir todas possibilidades de resolução dos possíveis problemas.

4. PROPOSTA PARA MITIGAÇÃO DE RISCOS NO SEB

Como proposta à mitigação dos riscos apresentados anteriormente a principal sugestão que está em pauta atualmente pelo setor é a operação de forma híbrida entre duas ou mais fontes. Tal formato de operação é questionado principalmente com o cunho de ganhos de Garantia Física ou complementariedade entre duas fontes intermitentes a fim de se obterem níveis de geração mais contínuos, e não com foco na segurança energética do SEB. Assim, o artigo em questão propõe a hibridicidade com um olhar voltado ao ganho real no sistema como um todo, propondo uma operação entre uma fonte intermitente e uma fonte de base controlada por um mesmo agente. Esta proposta pode até mesmo servir como inspiração aos países mencionados anteriormente que vem sofrendo com o problema não considerado previamente podendo resultar em uma saída para retomar a segurança energética de suas matrizes.

O princípio da combinação de uma geração hídrica com uma fonte renovável se dá devido ao fato do nível de confiança das gerações consideradas como base (hídrica e térmica), onde suas Garantias Físicas são resultados de modelos matemáticos que asseguram um atendimento mínimo de 95% da demanda. Já para as usinas intermitentes, os mesmos índices são representados por equações matemáticas simplificadas nas quais os históricos de geração demonstram atendimento aproximado não maior de 50% (dados referentes às usinas Eólica de Bons Ventos, Coqueirinho e usinas fotovoltaicas de Tanquinho e Tauá).

A Figura 8 apresenta uma simulação de geração híbrida entre uma fonte hídrica cuja Garantia Física representa 97MW, e por sua vez considerada como geração de base, e uma fonte renovável eólica com Garantia Física de 13MW, que é caracterizada como intermitente. Em uma operação isolada, somente a geração hídrica é considerada como energia de base, sendo somente esta considerada como energia assegurada pelo SEB. Já em uma operação híbrida, pode-se adicionar a Garantia Física da usina renovável à Garantia Física da usina hídrica combinando assim em uma única Garantia Física com geração de base, visto que os reservatórios das usinas hídricas podem suprir quaisquer oscilações da geração intermitente e continuar atingindo índices de 95% de atendimento à demanda. No caso em questão, passaríamos de uma geração de base de 97MW para 110MW, apresentando um ganho de 13,4% de confiabilidade ao SEB somente na operação de forma híbrida.

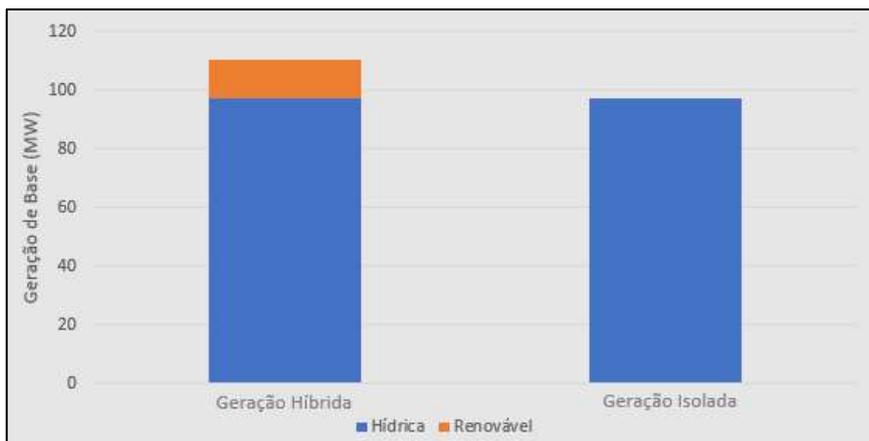


Figura 8: Comparativo entre energia de base na carga em geração tipicamente hídrica (isolada) e geração híbrida com usina renovável

Fonte: Próprio autor

Estes valores foram confirmados através do modelo matemático MA₂CG+ (LINO, 2023) que foi desenvolvido para estudos com o mesmo propósito de analisar ganhos em operações no formato híbrido. Modelo este que também foi utilizado para avaliação de ganhos secundários para a operação em questão que serão apresentados a seguir.

Adicionalmente ao acréscimo da geração de base o modelo apresentou, para condições em que há uma complementariedade relevante, que por sua vez possui curvas de gerações opostas entre as duas fontes, ganhos referentes a níveis de reservatório da fonte hídrica, o que significa uma maior segurança energética ao SEB aumentando o nível de confiança ao atendimento da Garantia Física mesmo em períodos secos, momento considerado crítico pelo ONS.

As Figuras 9 e 10 apresentam um exemplo de complementariedade ideal entre uma geração hídrica representada pela cascata do Rio Pardo, que é composta pelas usinas à fio d'água Limoeiro e Euclides da Cunha e pela usina de reservatório de Caconde, onde somente esta possui a capacidade de regularização e armazenamento de água (EAR), e pela usina renovável de Biomassa de Ester que possui picos de geração nos meses de julho, mês este considerado como o mais crítico para uma geração hídrica.

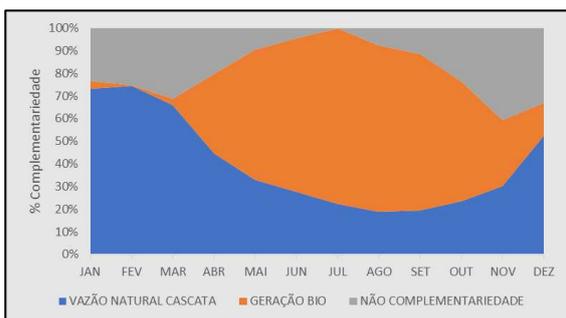


Figura 9: Análise de complementariedade entre vazão natural da cascata Rio Pardo e geração BIO Ester média

Fonte: Próprio autor

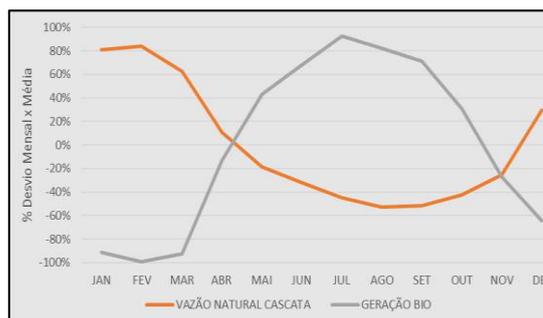


Figura 10: Comparativo entre vazão natural da cascata e geração BIO.

Fonte: Próprio autor

Através desta operação e como demonstrado na Figura 11, é notável um ganho do volume de reservatório de Caconde através de uma operação de forma híbrida juntamente com a usina de Biomassa de Ester, apresentando ganhos de 16,5% nos níveis de armazenamento (de 333hm³ para 388hm³), o que significa maior segurança ao sistema como um todo.

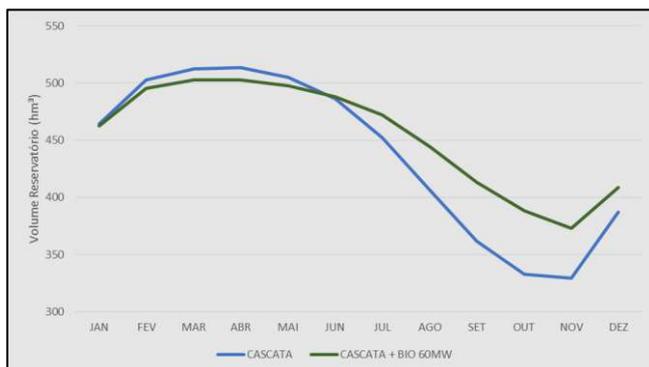


Figura 11: Comparativo entre volume final do reservatório de Caconde com e sem acréscimo de energia BIO Ester

Fonte: Próprio autor

Com o propósito de estender e confirmar a aplicabilidade da proposta de mitigação em questão também para o setor eólico, um dos focos da *Brazil Wind Power 2023*, a Figura 12 apresenta em uma operação similar a anterior alterando somente a usina de Biomassa de Ester pela usina Eólica de Bons Ventos, onde há ganhos de 5,15% nos níveis de Caconde, ganhos relativamente menores ao comparar com a operação em conjunto com Ester, mas ainda sim interessantes ao SEB, aumentando a segurança energética somente com a operação em formato híbrido. Esta diferença pode ser verificada na Figura 13, onde demonstra que o pico de geração de Bons Ventos acontece em setembro, mês este em que se está próximo ao período úmido, o que ainda assim é significativo para a geração hídrica, mas em níveis menores ao comparar com Ester que possui níveis de geração máxima no meio do período seco, em julho.

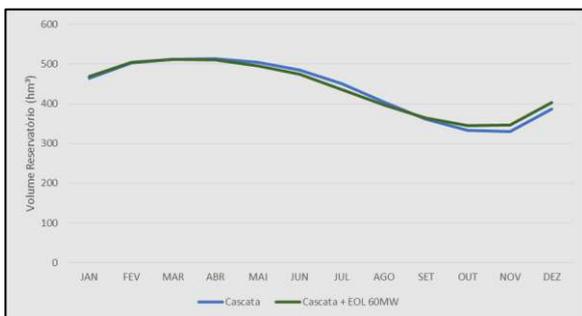


Figura 12: Comparativo entre volume final do reservatório de Caconde com e sem acréscimo de energia EOL Bons Ventos

Fonte: Próprio autor

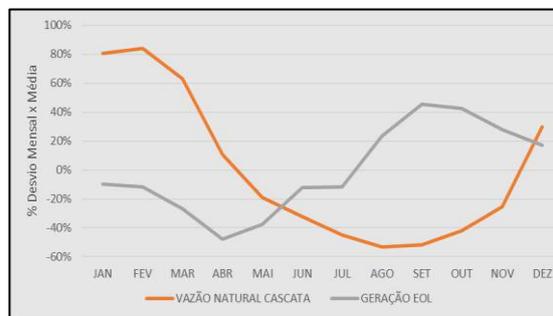


Figura 13: Comparativo entre vazão natural da cascata e geração eólica

Fonte: Próprio autor

5. CONCLUSÃO

É notável que uma inserção exacerbada de gerações renováveis sem análise de impactos na matriz eletroenergética pode levar o Brasil aos mesmos problemas que grandes potências mundiais já estão enfrentando. Sendo assim é necessário rever questões de âmbito regulatório para garantir a atratividade de geradores de energia de todas as fontes de geração, a fim de se evitar favorecimentos a certas fontes de geração. Observa-se a inexistência de regulamentações tanto em questões operativas como comerciais, as quais são necessárias para a complexidade que a hibridicidade exige, não somente no SEB, como também em outros países.

Como visto no caso da China, investimentos massivos de energias renováveis intermitentes na matriz energética sem energia de base resultam em menor confiabilidade e energia firme ao sistema, porém quando operados em regimes híbridos, como observado nos estudos de caso realizados com a cascata do Rio Pardo, esta geração poderia ser considerada como geração de base devido à grande confiabilidade da geração híbrida, aumentando assim a garantia de energia firme ao sistema com os mesmos investimentos realizados para gerações isoladas. É claro que se trata dos mesmos ativos de geração, mas muda-se a forma contábil de gerir os despachos, bem como a perspectiva de remuneração dos agentes de geração.

Em outros estudos realizados através do mesmo modelo da geração de forma cooperativa e híbrida com as fontes renováveis, tem-se a possibilidade de se obter ganhos de segurança energética. Esta análise indica que níveis de reservatório podem ser mantidos em média com maior armazenamento de energia potencial em períodos críticos de geração, principalmente para a combinação com a geração por biomassa, mas também por qualquer outra fonte que possua curva de geração complementar à hídrica.

Um último fator a ser considerado, é a avaliação do quanto a inserção de fontes intermitentes em sistemas eletroenergéticos deve ser combinada de forma que a geração de base consiga mitigar riscos operacionais como um todo e favorecer todos os agentes de geração de forma igualitária, ou seja, qual seria o “blend” ideal na geração de base.

REFERÊNCIAS

[Arial 10] CCEE – CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA – Balanço Energético 2022.

EPE, EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. Balanço Energético Nacional, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022f>. Acesso em 28/06/2022.

EPE, EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS. Balanço Energético Nacional, 2010. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2010f>. Acesso em 28/06/2022.

GURTLER, K; et al. The dismantling of renewable energy policies: The cases of Spain and the Czech Republic. Energy Policy. Volume 133, October 2019.

HALLACK, M. The role of regulatory learning in energy transition: the case of solar PV in Brazil. Milan, Italy: Center for Research on Energy and Environmental Economic and Policy (IEFE), Bocconi University, April, 2017. Disponível em: <<https://goo.gl/CQ4hmt>>.

IEA, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Key World Energy Statistics 2016. International Energy Agency. <http://www.iea.org>.

IEMA Instituto de Energia e Meio Ambiente - Prioridades para a integração das fontes renováveis variáveis no sistema elétrico. São Paulo, 2016.

IRENA, INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Installed renewable electricity capacity, 2021. Disponível em: https://pxweb.irena.org/pxweb/en/IRENASTAT/IRENASTAT__Power%20Capacity%20and%20Generation/RECAP_2022_cycle1.px/. Acesso em 28/06/2022.

KEPING ZHU et. al. Capacity-Credit Evaluation of Renewable Energy Power in Jiaying City based on Monte-Carlo Simulation. International Conference on Power System Technology (POWERCON), 2021.

LINO, V. F.; Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para avaliação de garantia física híbrida em fontes renováveis. Tese de doutorado, UNICAMP. 2023;

LOSEKANN, L. D.; Desafio do setor elétrico brasileiro: novo papel dos reservatórios. Blog Infopetro, 12 ago. 2013. Disponível em: <<https://goo.gl/caQGdw>>.

MME – MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. BEN 2023 – Balanço Energético Nacional 2023.

MINGYANG SMART ENERGY. Leading innovation: MingYang Smart Energy launches MySE 16.0-242, the world's largest offshore Hybrid Drive wind turbine,2021. Disponível em: <http://www.myse.com.cn/en/jtxw/info.aspx?itemid=825>.

ONS, Operador Nacional do Sistema ELÉTRICO. Plano da Operação O que é o ONS, 2004. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>. Acesso em 28 de junho de 2022.

SIRIN, S. M. et. al. How do variable renewable energy technologies affect firm-level day-ahead output decisions: Evidence from the Turkish wholesale electricity market. Energy Economics. Volume 112. August, 2022.