



Análise do Descomissionamento de Torres Eólicas

MONTEIRO, D. F. S¹; DA COSTA, B. B. F².

diegofsmonteiro@gmail.com ¹;

¹ Mestrado Engenharia Ambiental, Instituto Federal Fluminense - IFF - Macaé – RJ, BR.

² DSc. Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ - Macaé – RJ, BR.

Informações do Artigo

Palavras-chave:

Aerogeradores

Fonte renovável

Torre eólica

Onshore

Offshore

Resumo:

Este artigo visa compreender o descomissionamento de fazendas eólicas em âmbito onshore e offshore, e o impacto do ecossistema global para que tenhamos um processo de geração eólica sustentável e seguro. Este projeto visa a instrução e direcionamento para o descomissionamento de torres eólicas já instaladas e com o fim da vida útil em andamento ou já expiradas, não sendo mais viável ou permissível o processo de exploração e geração da energia eólica por um fator de segurança e/ou regulatório, sendo necessária a avaliação ambiental das áreas geográficas comissionadas. O Descomissionamento da energia eólica é o processo de desmobilizar uma torre ou fazenda previamente instalada com a vida útil em fase final da exploração energética, também existem razões de descomissionamento avaliados por instalações de usinas ou fazendas eólicas em locais inapropriados para a exploração, no caso instalações realizadas em áreas urbanas ou rural com habitação humana onde são realizados o cultivo e a produção agrônômica. Esta pesquisa visa qualificar diretrizes a gestão inteligente e eficiente do descomissionamento das fazendas eólicas, com a conjuntura de melhorar a destinação correta de cada um dos componentes abrangentes em um sistema da torre eólica, seja qual for a condição em que são encontrados fisicamente.

Abstract:

This article aims to understand the decommissioning of wind farms onshore and offshore, and the impact on the global ecosystem, to have a sustainable and safe wind generation process. This project will provide instruction and guidance for the decommissioning of wind towers that are nearing the end of their useful life or have already expired, since the process of exploring and generating wind energy is no longer viable or permissible due to a safety and/or regulatory factor, requiring an environmental assessment of the commissioned geographic areas. The decommissioning of wind energy is the process of demobilizing a tower or farm installed with life in the final phase of energy exploration. There are reasons for decommissioning that are assessed by the installation of wind power plants or farms in locations inappropriate for exploration, in the case of installations carried out in urban or rural areas with human habitation where are performed agronomic production. This research aims to qualify guidelines for the intelligent and efficient management of the decommissioning of wind farms, with the aim of improving the correct disposal of each of the comprehensive components in a wind tower system, regardless of the condition in which they are physically found.

1. Introdução

No cenário mundial ao qual vivemos, governos e organizações buscam meios de atender ao consumo energético em constante crescimento e demandante em diversas nações no mundo, não só isto, mas também uma busca por meios de gerações de energias que neutralizem ou reduzam o efeito devastador na camada de ozônio, não atacando o bioma do Planeta Terra com as emissões dos gases efeito estufa.

Visando este modelo de geração limpa (Spielmann et al., 2023), no Brasil temos as fontes de energias renováveis que ocupam relevada importância na matriz energética mundial nos fatores de exploração, produção, e consumo, deste modo temos hoje no Brasil uma grande potência em estudos e implantações em processo de exploração de energias limpas por meio de fonte hídrica, solar e vento. Mas com toda implementação e implantação vem acompanhadas as preocupações de como será a vida útil até o término da fase de exploração (Watson et al., 2024). Fato que necessita de um plano e mapeamento de destinação final ainda na fase do estudo do comissionamento, para que o comissionamento de um sistema energético seja assertivo até o último momento da geração de energia vindo a ocorrer o seu descomissionamento.

Visando neste artigo a energia eólica como direcionador a ser seguido com este modelo de exploração energética limpa (Abrahamsen et al., 2023), um fator impulsionador é o respeito ao meio ambiente junto a fauna, a flora e aos seres humanos habitantes que transitam e existem nas regiões onde estão instaladas as torres de energia eólica, isto para evitar que ocorram incidentes ou acidentes com qualquer espécie de vida nos locais onde estão instalados os parques eólicos.

Temos alguns desafios a serem seguidos ao tratar da reciclagem em um sistema de torre eólica, em sua maioria de materiais compostos existe uma facilidade na reutilização por tratar de peças metálicas em exemplo as torres (bases

das turbinas), sistemas de fixação e rolagem, sistemas de direcionamento, transformadores, e cabos para a condução elétrica, assim em sua grande parte e maioria dos materiais metálicos já temos empresas de reciclagem nacionais e internacionais que facilmente aceitam a sucata deste material para o tratamento correto e validam um retorno seguro do material para novos projetos pós tratamento de reciclagem.

Há modelos de torres eólicas que em sua estrutura contam com bases cimentícias nas torres, desde a sua fundação, até o cume da torre onde toda a estrutura vertical é baseada em cimentação, este modelo também precisa de avaliação e destinação final, porém o material aplicado neste modelo de torre, também é altamente atrativo ao tratamento pós desmantelamento e reciclagem, pois podem ser direcionados a aplicações de construções civil.

Mas também é necessária uma avaliação de materiais que são classificados como PRF (Polímero Reforçado com Fibra), estes materiais em um contexto geral contêm em sua estrutura fibra de vidro para garantir uma maior durabilidade (Lund; Madsen, 2024) e resistência mecânica contra fadigas e danos plásticos em sua estrutura, por serem materiais com uma ductilidade elevada, precisam de um tratamento mais arrojado para que possa se tornar mais fácil o remodelamento, ocasionando em um aumento de custo a este tipo de tratamento em específico vindo a não ser um atrativo as empresas que trabalham com coleta e reciclagem de materiais.

O estudo deste projeto guia a um plano de descomissionamento de eólicas, baseando no ciclo de vida do sistema comissionado, seja este sistema com o ciclo de vida avançado e em declínio da geração energética, (Neto et al., 2024) (Irawan; Wall; Jones, 2019), ou até mesmo com o ciclo de vida em fase inicial, porém para este configura-se a visão do descomissionamento por instalação em áreas impróprias para a geração energética, em exemplo áreas urbanas ou rurais com fácil acesso e residências humanas, nesta última

avaliação o ideal é descomissionar o sistema e comissionar em uma nova área onde seja adequada a exploração energética, sem ocasionar impactos no ecossistema local.

Este artigo compila estudos de casos já existentes que serão um guia para o aprimoramento dos estudos e implementação nas regiões de interesse ao descomissionamento das torres eólicas. Poderemos observar que a desmontagem dos componentes e segregação dos resíduos com o direcionamento para a reutilização dos materiais de forma eficiente e inteligente, irão trazer benefícios ambientais e financeiros.

Acredita-se que os estudos e implantações existentes, poderão guiar para que ocorra uma direção mais assertiva nos desafios da implementação deste projeto, uma vez que poderão ser levantados aspectos de falhas, análises de causas raízes e sucessos já conquistados com projetos anteriores, mesmo estes sendo realizados com estudos de instalações eólicas em outras nacionalidades.

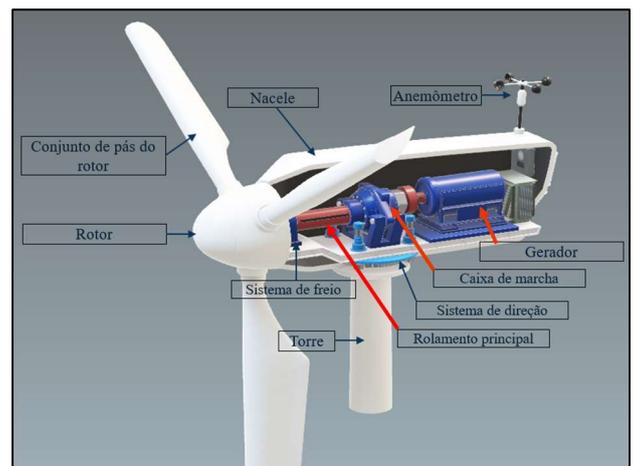
Hoje o Brasil possui uma geração de energia elétrica por fonte eólica equivalente a 20 GWh (capacidade máxima de geração via ONS), não podemos simplesmente avaliar a necessidade de um descomissionamento de torre eólica e gerar uma descompensação no sistema já existente, pois a energia gerada hoje faz parte e contribui ao fator geração do Sistema Interligado Nacional (SIN), baseado em dados em tempo real do Organizador Nacional do Sistema (ONS), o fator de 20 GWh apresentado são dados coletados no sistema do ONS para o ano e mês da publicação deste artigo.

Outro fator importante é a avaliação do dióxido de carbono (CO₂e) equivalente que é reduzido com a geração da energia renovável, são estimados em torno de 11 gramas de CO₂e (Dióxido de Carbono equivalente) não despejados ao meio ambiente com a geração da energia por meio totalmente renovável (medição representativa para sistema eólico), sendo hoje o Brasil responsável anualmente por uma redução na emissão de 4.11 bilhões de quilogramas toneladas de CO₂e (dióxido de carbono equivalente) com a sua geração de 20 GWh, cálculo realizado pelo autor do projeto com a

capacidade do sistema de geração em plenitude de aproximadamente 12 horas contínuas da geração desta carga em 1 dia na máxima energética gerada, dados também obtidos via Operador Nacional do Sistema via Sistema Interligado Nacional para o mês e ano desta publicação.

Também pode ser avaliada a utilização destes materiais que não sofreram danos mecânicos ou plásticos (Demuytere et al., 2024), posterior inspeção de ensaio não destrutivo (END) para aplicação em pontes ou passarelas para tráfegos de humanos e animais, a junção de pás eólicas que compreendem o comprimento médio de 80 metros com largura de 4 metros para a montagem do sistema de passarelas (Zhang, et al., 2023) para que ocorra o trânsito das espécies de um lado ao outro da rodovia. Com isto é possível preservar a vida de muitas espécies, inclusive humanas, para o caso de pontes ou passarelas que cruzam rodovias de auto fluxo de veículos. Além de representar ganho financeiro com o reaproveitamento das pás eólicas, sendo aplicada a reutilização de um material PRF (Polímero Reforçado com Fibra) com alta longevidade de vida útil, estimado o tempo de vida para uma torre de 20 anos, as pás eólicas por ter material reforçado conseguem alcançar 100 anos de vida útil (figura 1).

Figura 1 – Ilustração componentes de torre eólica



Fonte: Autor

É necessário realizar o estudo de torres eólicas (Zhang, et al., 2024) que possam passar por processo de atualização do sistema de geração realizando uma equivalência na geração de energia para a maior, com a implementação

de novas tecnologias podendo assim reduzir a área espaçada por torres pré-existentes com a ideia de ocupar menos espaço com maior potencial de geração de energia elétrica.

A capacidade de geração inicial no Brasil entre os anos 90 (início das operações com eólicas no Brasil) e início dos anos 2000 até 2015 compreendiam uma geração de aproximadamente 5MWh a 6MWh de geração por torre eólica, hoje as tecnologias empregadas por sistema conseguem alcançar a marca de 13MWh, um avanço tecnológico e otimizador do fator geração de carga por torre eólica, as novas tecnologias abrangem maior potencial com menor espaço por área de instalação.

1.1. Objetivo

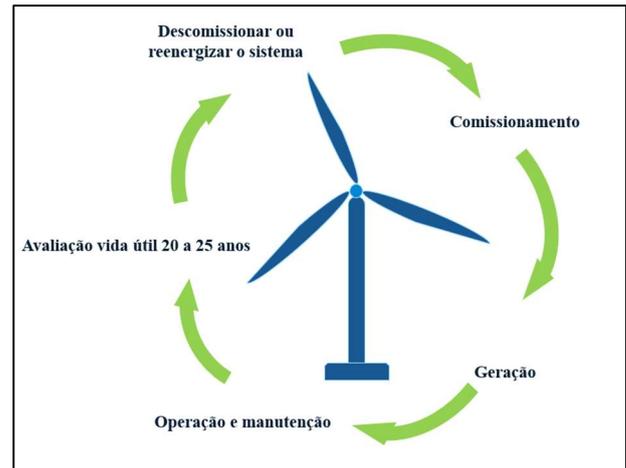
A escolha deste tema de descomissionamento de eólicas se dá em razão a relevada urgência do tema, apesar de termos pesquisas abrangentes em nível mundial, no Brasil ainda contamos com um fator embrionário a pesquisa neste âmbito de descomissionamento de eólicas.

A expectativa a ser alcançada com este artigo é de poder contribuir para a pesquisa no tema proposto "Análise do Descomissionamento de Eólicas" e com isto poder disseminar e ampliar a ideia de implementação e implantação deste modelo de descomissionamento, assegurando qualidade ambiental aos próximos descomissionamentos.

Analisar o impacto do descomissionamento das torres eólicas, e avaliação da reenergização dos modelos com idade avançada (retrofit);

- Analisar o ciclo de vida da instalação eólica (LCA – Life Cycle Assessment), verificando a condição do tempo ideal ao descomissionamento;
- Avaliação energética do panorama da realização do retrofit (modernização ou reenergização) das torres eólicas atualmente existentes (figura 2);

Figura 2 – Ciclo de vida e avaliação torre eólica



Fonte: Autor

- Avaliar solução para um modelo ótimo da alteração do local onde existem torres eólicas instaladas em áreas urbanas e/ou rurais que ocasionam em poluição visual e sonora;
- Avaliar o descomissionamento, porém sem gerar impacto negativo na geração energética atual distribuída ao Sistema Interligado Nacional, garantindo soluções de otimização em torres que possam ser reaproveitadas para realizar a compensação dos sistemas descomissionados.
- Analisar a destinação correta dos materiais desmantelados em sua totalidade, realizando avaliação do reaproveitamento e ideias de como utilizar materiais que não irão precisar passar por tratamento mecânico, com potencial reutilização em pontes, passarelas, e outras construções civis, este último para pás eólicas.

2. Métodos

Temos dois fatores atuais a serem avaliados como método em âmbito mundial que implicam nesta pesquisa, o primeiro fator é a forte tendência de uma mudança de fornecimento de energia para fontes renováveis (Kramer et al., 2024), e este aspecto visa muito a instalação e comissionamento de novas fazendas eólicas, o segundo fator é sobre as torres eólicas já comissionadas que estão com o seu ciclo de vida perto de encerrar, ou já encerrados e que ainda

podem estar em operação, trazendo risco operacional e ambiental.

Os pontos de atenção a isto são os materiais a serem descomissionados que precisam ser destinados a algum destino para tratamento correto (Jalili et al., 2024), porém este destino como observado em muitas pesquisas já existentes, ainda não tem um direcionamento assertivo do que irão se transformar no futuro pós descomissionamento (Topham et al., 2019), e estamos tratando de materiais ricos em estrutura polimérica e muitos que podem não ter sofrido dano em sua estrutura e com isto podem trazer ganhos ao ser instalados em outras formas de utilização. Em especial os materiais PRF (Polímeros Reforçados com Fibra) são os mais preocupantes a serem classificados para o momento final do desmantelamento, na razão do alto custo para o tratamento da recuperação e tratamento.

Ocorre também o benefício de poder reenergizar alguns sistemas já existentes, ou substituir toda a estrutura da torre eólica por uma nova com um potencial de fornecimento energético mais elevado (Szumilas-Kowalczyk; Pevzner; Giendych, 2020).

3. Resultados e Discussão

O foco deste artigo direciona a uma avaliação do ciclo de vida de uma torre eólica, com o foco a contribuir para o desenvolvimento de práticas e tecnologias que otimizem o descomissionamento de um sistema de torres em âmbito onshore e offshore, promovendo uma indústria eólica mais sustentável.

Hoje é possível prever uma análise de quando e o que fazer com um sistema a ser comissionado garantindo um estudo de vida útil antes mesmo de comissionar uma fazenda eólica, uma visão não existente no passado, que só garantia a instalação das fazendas eólicas e não tinham um projeto ou plano para o término da vida útil do sistema de geração.

Os materiais avaliados inicialmente para este projeto, envolvem a integração de diversas áreas de conhecimento, como engenharia, meio ambiente, economia e políticas públicas. Sobre o descomissionamento foi encontrado o

conceito do assunto, definições da importância do ciclo de vida das torres eólicas e informada a sua relevância para a sustentabilidade.

Sobre o processo de desmontagem, são citados alguns componentes com discussões técnicas e alguns métodos utilizados em exemplo para o desmantelamento das pás, nacela, torre, sistemas de fixação, sistemas de geração, e envolvendo também aspectos relacionados à segurança operacional e ambiental das localizações geográficas instaladas e seus riscos abrangentes. Também na desmontagem do sistema é possível encontrar informações sobre a reciclagem de metais e materiais compósitos, e os desafios que são atrelados a reciclagem de alguns tipos de materiais, em específico o mais citado são os materiais a base de PRF (Polímero Reforçado com Fibra).

Os impactos ambientais e gestão de resíduos são mencionados com avaliação e discussão acerca de impactos ambientais imediatos posterior comissionamento e descomissionamento, em específico ao comissionamento poluição sonora, visual e distúrbios no solo ou em outras áreas de aplicação. Ao descomissionamento a preocupação de ter a descompensação de dióxido de carbono (CO₂) lançado na atmosfera com a não compensação por dióxido de carbono equivalente (CO₂e), pois com a não geração da energia limpa ocorre o efeito revés sobre a emissão do poluente.

Nas pesquisas realizadas nos artigos bases para este documento, são encontrados exemplos de regulamentações e políticas internacionais em países da União Europeia, Estados Unidos e China são amplamente citados, uma vez que estas nações já contém um avanço tecnológico para este tipo de pesquisa e seguem com a preocupação do que fazer com os sistemas que já contam com idade avançada. Estes também apresentam estudos com lições aprendidas e iniciativas do que fazer para prevenir riscos operacionais tanto ao descomissionamento quanto ao retrofit (reenergização) de um sistema.

Os estudos atuais relacionados ao tema energia eólica contam com estudos de casos de

projetos que já estão em avanço em larga escala internacional, e estes são a base do direcionamento desta pesquisa.

Como proposta a futuras ações de uma avaliação no sistema de torres eólicas já comissionadas ou a comissionar, é conveniente o direcionamento balizado com as seguintes pesquisas do ciclo de vida da torre eólica para detalhar na forma de reduzir os impactos ambientais do sistema eólico ao longo do seu ciclo de existência, e definir os limites do sistema instalado ou a ser instalado (comissionado), incluindo etapas do ciclo de vida a serem consideradas de acordo abaixo:

- Inventário do ciclo de vida (LCI – Life Cycle Inventory):

Extração de matérias-primas: Coleta de dados sobre a extração e processamento dos materiais utilizados na construção da torre eólica (exemplo: aço, concreto, fibras de vidro);

Instalação: Impactos ambientais da construção e montagem da torre eólica no local; Descomissionamento e descarte: Análise do impacto ambiental do desmantelamento da torre eólica e disposição final dos materiais, incluindo reciclagem.

- Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (LCIA – Life Cycle Impact Assessment):

Categorias de impacto: Seleção de categorias de impacto ambiental a serem avaliadas, como aquecimento global, acidificação, eutrofização, esgotamento de recursos, entre outros.

- Avaliação do Ciclo de Vida da Torre Eólica:

Identificação de melhorias: Identificação de áreas onde podem ser implementadas melhorias para reduzir os impactos ambientais; Tomada de decisões informadas: Fornecer informações para tomadores de decisão sobre a sustentabilidade das torres eólicas.

- Resultados Completos: Promove a apresentação completa dos resultados encontrados, incluindo sínteses qualitativas e quantitativas, análise de dados e discussões sobre a heterogeneidade dos estudos incluídos.

Ocorre também a avaliação positiva para a reenergização de torres eólicas de 20 a 30 anos atrás que entregavam em média 5MWh, hoje temos o potencial de torres que entregam 13MWh e podem ser comissionadas nas fazendas eólicas já existentes, ajudando a não perder o potencial de geração atual e contribuindo a entregar mais de 2,5 vezes da capacidade anterior instalada, ocorrendo na otimização do espaço anterior podendo duplicar a capacidade da geração a ser comissionada sem a necessidade de dobrar ou expandir a área de utilização, um fator ecologicamente sustentável

Com isto este trabalho será uma metodologia para a avaliação do descomissionamento do sistema de energia eólica ou realização do retrofit de uma unidade eólica existente, assim como poderá servir de estudo para a análise e viabilidade do projeto, é visado com este estudo gerar um direcionador para as já presentes e futuras aplicações deste modelo de descomissionamento e a unidades que seguirão com a reenergização.

Comprovar a eficiência e eficácia de um modelo de oportunidade em unidades eólicas já existentes podendo ser optado por exploração energética que carregará em seu projeto a pesquisa, informação sobre o gerenciamento e manutenção, com uma grande oportunidade de reaproveitamento das torres eólicas já existentes.

Também é almejado entregar uma energia limpa para consumo sem a emissão de gases efeito estufa em especial o CO₂ (dióxido de carbono), contribuindo positivamente com o bioma do Planeta Terra, conforme dados numéricos apresentados, hoje o Brasil possui relevada importância neste tema na compensação do CO₂e por ano com as atuais unidades de fazendas eólicas em operação, a marca de 4.11 bilhões de quilogramas toneladas de CO₂e (dióxido de carbono equivalente) valor calculado somente para meio período do dia por ano, pode comprovar a efetiva redução da emissão do poluente dióxido de carbono ao meio ambiente, no curto e longo prazo.

Os resultados obtidos com esta pesquisa posicionam a uma importância com fatores a ser

avaliados mediante as seguintes pontuações abaixo:

- Avaliação da reutilização dos subcomponentes de um sistema de torre eólico com alta longevidade em outros meios de aplicação, para torres a ser totalmente descomissionadas;

- Sugestão de reenergizar sistemas inoperantes e sistemas que precisam ser desmobilizados por instalação em área imprópria. Este fator de reenergização, gera ganho no fator geração por unidade instalada;

- O Brasil possui hoje em sua matriz energética uma geração diária de 20 Megawatts por meio de eólicas, número que precisa ser mantido por razão a contribuição que tem ao Sistema Interligado Nacional;

- Em avaliação a análise de comparação os sistemas de pouco menos dez anos atrás (2015) tinham um fator geração de 5MWh a 6MWh, hoje com a tecnologia empregada em novos sistemas eólicos, é alcançado 13MWh por torre eólica.

Portanto os achados indicados neste artigo estão associados a um melhor fator de avaliação do sistema e vida útil de uma eólica, mostrando ganhos tanto ao sistema eólico, quanto ao fator respeito ao meio ambiente.

4. Conclusão

O objetivo principal deste projeto alcança a necessidade da avaliação de estudos em torres eólicas já implantados e no término da vida útil, ou com instalações realizadas em locais não bem sugeridos para a exploração energética, locais estes onde ocorrem trânsito de vidas humanas e espécies de faunas diversas, sejam estas aéreas ou terrestres, assim como também, a necessidade da avaliação dos novos projetos de eólicas a serem instalados, para estes novos projetos, direcionar um futuro assertivo a instalação com o plano de vida útil mapeado desde o início da fase operacional da torre eólica.

Aos modelos de aplicação que deverão sofrer o retrofit (reenergização) de torres continuarão a exploração energética gerando

energia limpa, porém também como apresentado em números, as tecnologias atuais empregadas nos sistemas de torres eólicas contam com maior capacidade de geração energética trazendo ganhos direcionados ao Sistema Interligado Nacional, aumentando a capacidade da geração por carga consumida na rede nacional Brasileira.

Este projeto visa direcionar a um modelo de avaliação prévio ao descomissionamento de fazendas eólicas com idade avançada e com risco operacional, e apresentar a viabilidade de reenergizar ou substituir torres sem capacidade de geração por meio de retrofit (Piel, et al., 2019), com isto este projeto visa agregar valor com os seguintes estudos apresentados abaixo:

- Verificar sobre reestruturação de torres com vantagens operacionais sobre os modelos existentes com baixa geração de carga, a avaliação da instalação ou atualização de um sistema com potencial a maior para geração de carga (Megawatts) por unidade eólica, poderá otimizar modelos de torres, elevando o potencial da geração por menor área espaçada.

- Estudar o impacto ambiental positivo gerado desde a instalação (comissionamento) e desinstalação (descomissionamento) das torres eólicas (Delaney et al., 2023), com manutenção, operação e controle da geração da energia. Garantindo um futuro assertivo e planejamento estratégico por sistema eólico comissionado ou a ser comissionado.

- Este artigo contribui e visa a direcionar o respeito ao ecossistema direcionando a fauna e flora existente as regiões onde os estudos de viabilidade para a geração e exploração energética sejam realizados por meio das fazendas eólicas, onde toda espécie de vida deverá ser respeitada e preservada, não alterando a característica natural do habitat regional.

- Também com este trabalho é direcionado a informação da contribuição realizada ao meio ambiente com o fator de equivalência do dióxido de carbono não despejado na atmosfera com a geração da energia limpa por meio eólico, hoje no Brasil a redução anual atual de 4.11 bilhões de quilogramas toneladas de CO₂e, é

uma representatividade da contribuição que podemos contribuir mantendo esta geração energética ativa.

5. Revisão Bibliográfica

Os trabalhos utilizados como fator direcionador a esta pesquisa, contam com conteúdo publicados em um período de cinco anos anteriores a data da publicação deste artigo, sendo estes temas direcionados mediante a classificação da importância da energia gerada por meio desta fonte renovável (eólica), avaliação dos benefícios ambientais, avaliação dos riscos de uma geração não bem classificada, em modo levantado abaixo:

- Benefício ambiental: fator balizador a redução de gases efeito estufa, gerando compensação dos gases já lançados na atmosfera;

- Avaliação da vida útil do sistema eólico: direcionar a fatores de decisões para a avaliação do ciclo de vida de um sistema eólico desde o começo ao término da operação;

- Impactos negativos: Impacto em habitats naturais com sistemas não bem planejados a instalação, impacto negativo a fauna aérea e terrestre;

- Avaliação de aceitação social: locais onde tenham ocorrido instalações de torres eólicas com trânsito de humanos e os impactos que podem ser causados a estas vidas.

- Perspectiva e futuro: em muitos trabalhos é observada uma preocupação com o grande e potencial de energia a ser comissionado, em razão a demandante energética mundial, mas a preocupação de comissionar um sistema com classificação do início ao fim, é um fator que gera grande reflexão, pois estes sistemas irão chegar ao término de suas vidas úteis, e o plano de descomissionamento precisa estar preparado para receber esta grande carga futura e atual que já segue ocorrendo.

- É notado que os locais que mais estão com investimento neste tipo de tecnologia para descomissionamento e avaliação de reenergização, são concentrados entre China, países da União Europeia e Estados Unidos. As

políticas regionais mencionadas em determinados artigos pesquisados, mostram uma preocupação mais assertiva e direcionadora com o incentivo governamental para apoio ao assunto relacionado a geração por meio desta fonte energética.

- Observado também que no Brasil temos sistemas instalados desde o início dos anos 90, mas que ainda seguem sem o plano de descomissionamento, fator preocupante, pois existe um de fator risco associado, os sistemas previamente instalados e com mais de 20 a 25 anos já não possuem fator de segurança validado para continuarem nos locais onde estão, os sistemas de eólicas, assim como todo sistema de máquinas, precisa passar e ser acompanhado por inspeções periódicas.

- Grande parte dos trabalhos direcionam um foco ao avanço tecnológico empregado na solução da problemática do descomissionamento e informam como tratar este sistema classificado como não mais viável para operação, fator este que sobressai para a avaliação dos componentes de alta durabilidade da torre eólica, ressaltando que existe um futuro útil para o material a ser tratado.

A reflexão obtida com estes estudos e pesquisas anteriores, classificam uma preocupação a um plano direcionador para redução de impactos negativos que podem ser ocasionados por meio de um sistema eólico, mas com soluções plausíveis a contornar o revés apresentado em cada um dos artigos.

6. Referências

- [1] Abrahamsen, A. B., Beauson J., Lund, K. W., Madsen, E. S., Rudolph, D. P., Jensen, J. P. Method for estimating the future annual mass of decommissioned wind turbine blade material in Denmark. Artigo por Livraria Wiley, 2023.
- [2] Delaney, E. L., Leahy, P. G., McKinley, J. M., Gentry, T. R., Nagle, A. J., Elberling, J., and Bank, L. C. Sustainability Implications of Current Approaches to End-of-Life of Wind Turbine Blades — A Review. Artigo por MDPI Journal of Sustainability, 2023.
- [3] Demuytere, C., Vanderveken, I., Thomassen, G., León, M. F. G., Peña, L. V. L., Blommaert, C., Vermeir, J., Dewulf, J. Prospective material flow analysis of the end-of-life decommissioning: Case study of a North Sea offshore wind farm. Artigo por journal Resources, Conservation & Recycling, 2024.
- [4] Irawan, C. A., Wall, G., Jones, D. An optimization model for scheduling the decommissioning of an offshore wind farm. Artigo por Springer-Verlag GmbH Germany, 2019.
- [5] Jalili, S., Maheri, A., Ivanovic A., Neilson, R., Bentin, M., Kotzur, S., May, R., Sünnner, I. Economic and environmental assessments to support the decision-making process in the offshore wind farm decommissioning projects. Artigo por Journal Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024.
- [6] Kramer, K. J., Abrahamsen, A. B., Beauson, J., Hansen, U. E., Clausen, N., Velenturf, A. P. M., Schmidt, M. Quantifying circular economy pathways of decommissioned onshore wind turbines: The case of Denmark and Germany. Artigo por Journal Sustainable Production and Consumption, 2024.
- [7] Laurentis, C., Windemer, R. When the turbines stop: Unveiling the factors shaping end-of-life decisions of ageing wind infrastructure in Italy. Artigo por Journal Energy Research & Social Science, 2024.
- [8] Lund, K. W., Madsen, E. S. State-of-the-art value chain roadmap for sustainable end-of-life wind turbine blades. Artigo por Journal Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024.
- [9] Neto, J. A., González, M. O. A., Castro, R. L. P., Melo, D. C., Aiquoc, K. M., Santiso, A. M., Vasconcelos, R. M., Souza, L. H., and Cabral, E. L. S. Factors Influencing the Decision-Making Process at the End-of-Life Cycle of Onshore Wind Farms: A Systematic Review. Artigo por MDPI Journal of Energies, 2024.
- [10] Piasecka, I., Tomporowski, A., Flizikowski, J., Kruszelnicka, W., Kasner, R. and Mroziński, A. Life Cycle Analysis of Ecological Impacts of an Offshore and a Land-Based Wind Power Plant. Journal of Applied Sciences, 2019.
- [11] Piel, J., Stetter, C., Heumann, M., Westbomke, M., & Breitner, M. H. Lifetime Extension, Repowering or Decommissioning? Decision Support for Operators of Ageing Wind Turbines. Journal of Physics: Conference Series 1222, 2019.
- [12] Ramos Júnior, M. J., Medeiros, D. L., & Almeida, E. S. Blade manufacturing for onshore and offshore wind farms: the energy and environmental performance for a case study in Brazil. Artigo, 2023.
- [13] Spielmann, V., Dannheim, J., Brey, T., Coolen, J. W.P. Decommissioning of offshore wind farms and its impact on benthic ecology. Artigo por Journal of Environmental Management, 2023.
- [14] Szumilas-Kowalczyk, H., Pevzner, N., & Giedych, R. Long-term visual impacts of aging infrastructure: Challenges of decommissioning wind power infrastructure and a survey of alternative strategies. Renewable Energy, 150, 550–560, Journal por Elsevier, 2020.
- [15] Topham, E., McMillan, D., Bradley, S., & Hart, E. Recycling offshore wind farms at

- decommissioning stage. *Energy Policy*, 129, 698–709, Journal por Elsevier, 2019.
- [16] Watson, S. C. L., Somerfield, P. J., Lemasson, A. J., Knights, A. M., Edwards-Jones, A., Nunes, J., Pascoe, C., McNeill, C. L., Schratzberger, M., Thompson, M. S. A., Couce, E., Szostek, C. L., Baxter, H., Beaumont, N. J. The global impact of offshore wind farms on ecosystem services. *Artigo por Journal Ocean and Coastal Management*, 2024.
- [17] Xu, Y., Wang, F., Liang, D., Lv, G., Chen, C. A comprehensive review of waste wind turbine blades in China: Current status and resource utilization. *Artigo por Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024.
- [18] Yildiz, N., Hemida H., Baniotopoulos, C. Operation, Maintenance, and Decommissioning Cost in Life-Cycle Cost Analysis of Floating Wind Turbines. *Artigo por MDPI Journal of Energies*, 2024.
- [19] Zhang, D., Huang, Z., Shi, X., Sun, X., Zhou, T., Yang, H., Bie, R., Zhang, M. Experimental Study and Process Simulation on Pyrolysis Characteristics of Decommissioned Wind Turbine Blades. *Artigo por MDPI Journal of Energies*, 2024.
- [20] Zhang, W., Yu, H., Yin, B., Akbar, A., Liew, K. M. Sustainable transformation of end-of-life wind turbine blades: Advancing clean energy solutions in civil engineering through recycling and upcycling. *Artigo por Journal of Cleaner Production*, 2023.