

## DESAFIOS NA IMPLEMENTAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS: INTEGRAÇÃO ENTRE INFRAESTRUTURA CIVIL, AERODINÂMICA MECÂNICA E SISTEMAS DE POTÊNCIA ELÉTRICA

CHALLENGES IN THE IMPLEMENTATION OF WIND FARMS: INTEGRATION BETWEEN CIVIL INFRASTRUCTURE, MECHANICAL AERODYNAMICS, AND ELECTRICAL POWER SYSTEMS

DESAFÍOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE PARQUES EÓLICOS: INTEGRACIÓN ENTRE INFRAESTRUTURA CIVIL, AERODINÂMICA MECÁNICA Y SISTEMAS DE POTENCIA ELÉCTRICA

Laís Nicolau Alves Bitencourt<sup>1</sup>  
Laryssa Alves Rosete<sup>2</sup>  
Jones Araújo de Oliveira<sup>3</sup>  
Raquel Gomes de Araújo<sup>4</sup>  
Elisson Eduardo da Silva<sup>5</sup>  
Breno Samir de Abreu Guimarães<sup>6</sup>

**RESUMO:** Este artigo apresenta uma revisão integrativa da literatura sobre os desafios na implementação de parques eólicos de grande porte, com foco na integração entre a Engenharia Civil, a Engenharia Mecânica e a Engenharia Elétrica. A metodologia foi fundamentada no protocolo PRISMA 2020, com busca sistematizada nas bases Scopus, Web of Science, IEEE Xplore e ScienceDirect. Foram incluídos estudos que abordaram o acoplamento multidisciplinar em aerogeradores multi-MW, excluindo pesquisas unidisciplinares isoladas. Os resultados evidenciam que os principais gargalos tecnológicos emergem nas interfaces entre essas três áreas, destacando-se a interação solo-estrutura na Engenharia Civil, os efeitos aeroelásticos e de fadiga na Engenharia Mecânica, e a atuação de sistemas avançados de controle e eletrônica de potência na Engenharia Elétrica. Observou-se que abordagens tradicionais sequenciais resultam em superdimensionamento estrutural e aumento do custo nivelado de energia (LCOE). Em contrapartida, estratégias baseadas em Otimização de Projeto Multidisciplinar (MDO) e uso de Gêmeos Digitais demonstram maior eficiência e confiabilidade operacional. Conclui-se que a viabilidade técnica e econômica de parques eólicos modernos depende da integração sistêmica entre essas áreas, sendo indispensável a adoção de modelos co-projetados e controlados em tempo real.

**Palavras-chave:** Energia eólica. Engenharia. Aeroelasticidade.

<sup>1</sup>Graduada em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA) e Pós-graduada em Automação e Eletrônica Industrial e Sistemas de Automação pela UniBF Centro Universitário.

<sup>2</sup>Graduada em Engenharia Elétrica pela Universidade Veiga de Almeida (Campus Tijuca - Rio de Janeiro, RJ), MBA em Gestão de projetos em TI e pós-graduada em Telecomunicações, com ênfase em redes e segurança.

<sup>3</sup>Graduado em Engenharia Civil Centro Universitário do Norte ( UNINORTE - Manaus), MBA em Orçamento, Planejamento e Controle na Construção civil pela UniBF, MBA em Projetos Aplicado à Construção Civil pela UniBF

<sup>4</sup>Graduada em Engenharia Mecânica pelo Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Maranhão (IFMA).

<sup>5</sup>Graduado em Engenharia elétrica pelo Centro Universitário Anhanguera São Paulo.

<sup>6</sup>Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará e Pós-graduado em Projetos de Automação Industrial e em Projetos Mecânicos pela Faculdade de São Marcos.

**ABSTRACT:** This article presents an integrative literature review on the challenges in the implementation of large-scale wind farms, focusing on the integration of Civil Engineering, Mechanical Engineering, and Electrical Engineering. The methodology was based on the PRISMA 2020 protocol, with a systematic search conducted in the Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, and ScienceDirect databases. Studies addressing multidisciplinary coupling in multi-MW wind turbines were included, while unidisciplinary studies were excluded. The results indicate that the main technological bottlenecks arise at the interfaces among these three fields, highlighting soil-structure interaction in Civil Engineering, aeroelastic and fatigue effects in Mechanical Engineering, and the role of advanced control systems and power electronics in Electrical Engineering. It was observed that traditional sequential approaches lead to structural overdesign and increased levelized cost of energy (LCOE). In contrast, strategies based on Multidisciplinary Design Optimization (MDO) and Digital Twins demonstrate greater efficiency and operational reliability. It is concluded that the technical and economic feasibility of modern wind farms depends on the systemic integration of these disciplines, making the adoption of co-designed and real-time controlled models essential.

**Keywords:** Wind energy. Multidisciplinary engineering. Aeroelasticity.

**RESUMEN:** Este artículo presenta una revisión integrativa de la literatura sobre los desafíos en la implementación de parques eólicos de gran escala, con énfasis en la integración de la Ingeniería Civil, la Ingeniería Mecánica y la Ingeniería Eléctrica. La metodología se basó en el protocolo PRISMA 2020, con una búsqueda sistematizada en las bases de datos Scopus, Web of Science, IEEE Xplore y ScienceDirect. Se incluyeron estudios que abordaron el acoplamiento multidisciplinario en aerogeneradores multi-MW, excluyendo investigaciones unidisciplinarias. Los resultados evidencian que los principales cuellos de botella tecnológicos surgen en las interfaces entre estas tres áreas, destacándose la interacción suelo-estructura en la Ingeniería Civil, los efectos aeroelásticos y de fatiga en la Ingeniería Mecánica, y la actuación de sistemas avanzados de control y electrónica de potencia en la Ingeniería Eléctrica. Se observó que los enfoques secuenciales tradicionales conducen a un sobredimensionamiento estructural y al aumento del costo nivelado de energía (LCOE). En contraste, estrategias basadas en la Optimización de Diseño Multidisciplinario (MDO) y el uso de Gemelos Digitales demuestran mayor eficiencia y confiabilidad operativa. Se concluye que la viabilidad técnica y económica de los parques eólicos modernos depende de la integración sistémica de estas disciplinas, siendo indispensable la adopción de modelos co-diseñados y controlados en tiempo real.

**Palabras clave:** Energía eólica. Ingeniería multidisciplinaria. Aeroelasticidad.

## INTRODUÇÃO

A urgência imposta pelas mudanças climáticas e a necessidade de descarbonização da matriz energética global posicionaram a energia eólica como um dos pilares da transição energética. Segundo o Global Wind Report 2024, publicado pelo Global Wind Energy Council (GWEC), a capacidade eólica instalada no mundo ultrapassou a marca histórica de 1 TW, impulsionada pelo compromisso firmado na COP28 de triplicar a capacidade de geração renovável até 2030 (GWEC, 2024). Para atingir essas metas ambiciosas, a indústria tem apostado no escalonamento sem precedentes dos aerogeradores (*upscaling*), com turbinas *offshore* e *onshore* que hoje ultrapassam a classe de 15 a 20 MW, apresentando rotores de dimensões colossais e instaladas em locais com condições ambientais cada vez mais severas.

Apesar do notável avanço comercial, o projeto, a implementação e a operação desses complexos eólicos impõem desafios técnicos que operam nos limites da física de materiais e da dinâmica de fluidos (Veers et al., 2022, 2023). As abordagens tradicionais de modelagem aerodinâmica e aeroelástica estão sendo pressionadas até os seus limites de aplicabilidade frente à magnitude e flexibilidade das arquiteturas modernas (Damiani, 2018; Veers et al., 2023). A complexidade do sistema exige que o aerogerador deixe de ser visto apenas como uma máquina rotativa isolada e passe a ser compreendido como um sistema mecatrônico altamente acoplado (Dirscherl et al., 2017; Veers et al., 2023).

No entanto, uma análise crítica do estado da arte revela uma lacuna metodológica persistente: a fragmentação do conhecimento entre as disciplinas clássicas da engenharia (Civil, Mecânica e Elétrica) (Ulsoy & Galip, 2013). A literatura demonstra que as práticas de projeto frequentemente adotam otimizações sequenciais ou paralelas, com comunicação limitada entre as equipes monodisciplinares (Guérineau et al., 2018). A Engenharia Civil atua no dimensionamento de fundações e torres sujeitas a cargas cíclicas extremas (Nounangnonhou et al., 2024); a Engenharia Mecânica concentra-se na eficiência aerodinâmica e na resistência à fadiga de componentes rotativos sob estresse aeroelástico (Kuik et al., 2016); e a Engenharia Elétrica foca em estratégias de controle, utilização de geradores duplamente alimentados (DFIG) ou conversores plenos (*full converters*) e nos impactos de sistemas de armazenamento de energia (BESS) para mitigar a intermitência na rede, conforme apontado por estudos recentes de integração à rede (Ejuh et al., 2025).

Essa compartimentalização resulta em orçamentos de fadiga excessivamente conservadores e subotimização do custo nivelado de energia (LCOE). Problemas de campo comprovam que a dinâmica de um parque eólico é indissociável: a vibração aerodinâmica das pás propaga-se estruturalmente, induzindo fadiga não linear nas fundações (*interação solo-estrutura*), o que, por sua vez, afeta o alinhamento do trem de potência e gera oscilações que a eletrônica de potência precisará compensar na injeção na rede. A necessidade dessa integração é corroborada pela crescente adoção de Gêmeos Digitais (*Digital Twins*) acoplados a sistemas de Monitoramento de Saúde Estrutural (SHM), que buscam fundir os dados de vibração e carga mecânica com os dados operacionais (SCADA) da geração elétrica para previsões de vida útil em tempo real.

Neste contexto, faz-se necessária uma síntese atualizada que conecte essas esferas de conhecimento. Portanto, o presente artigo apresenta uma revisão integrativa da literatura para

mapear e correlacionar os desafios na implementação de parques eólicos sob o prisma da otimização multidisciplinar (*Multidisciplinary Design Optimization - MDO*). O objetivo é demonstrar como a sinergia entre a infraestrutura civil, a aerodinâmica mecânica e os sistemas de potência elétrica é um fator crítico para a confiabilidade, segurança e viabilidade econômica dos projetos eólicos da próxima geração.

## MÉTODOS

Para garantir a transparência, a reprodutibilidade e a robustez analítica desta pesquisa, o desenho metodológico foi adaptado do protocolo PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) (PAGE *et al.*, 2021). Reconhecendo a natureza multidisciplinar do problema de pesquisa — que exige a triangulação de modelagens numéricas, ensaios empíricos em túnel de vento e dados geofísicos de campo —, as diretrizes do PRISMA foram adaptadas para o escopo de uma Revisão Integrativa da Literatura, conforme o *framework* de Whitemore e Knafl (2005).

A condução da pesquisa foi sistematizada em cinco estágios rigorosos: (1) Formulação do problema; (2) Estratégia de busca estruturada; (3) Triagem e elegibilidade; (4) Avaliação de qualidade e risco de viés; e (5) Extração e síntese de dados.

### 2.1. Estruturação da Busca e Bases de Dados

A formulação da estratégia de busca foi orientada pela estrutura PEO (*Population, Exposure, Outcomes*), adaptada para o contexto das engenharias:

**P (Problema/Sistema):** Sistemas de conversão de energia eólica de grande porte (aerogeradores multi-MW e parques eólicos).

**E (Exposição/Contexto):** Interações físicas e operacionais entre domínios monodisciplinares (aerodinâmica, infraestrutura civil, controle elétrico).

**O (Desfecho/Outcomes):** Fadiga sistêmica, instabilidade operacional, qualidade de energia e viabilidade de ciclo de vida.

O levantamento bibliográfico primário foi conduzido em quatro bases de dados de alto impacto científico e tecnológico: Scopus, Web of Science (WoS) Core Collection, IEEE Xplore e ScienceDirect. A busca foi realizada entre janeiro e abril de 2026, sem restrição quanto ao período de publicação dos estudos.

**Tabela 1.** Eixos Sintáticos e Equações de Busca Avançada

| Eixo (PEO)    | Strings de Busca Computacional (Operadores Booleanos)   |
|---------------|---|
| Problema (P)  | ("wind energy" OR "wind farm*" OR "wind turbine*" OR "WECS")  |
| Exposição (E) | AND ("multidisciplinary" OR "integration" OR "aeroelastic*" OR "soil-structure" OR "fluid-structure" OR "coupled dynamics") |
| Desfecho (O)  | AND ("fatigue" OR "failure" OR "reliability" OR "power quality" OR "stability" OR "LCOE")                                   |

## 2.2. Critérios de Elegibilidade

A mitigação de vieses de seleção foi assegurada pela definição prévia e estrita de critérios de inclusão (CI) e exclusão (CE), aplicados de forma independente por dois pesquisadores.

**Tabela 2.** Critérios Rigorosos de Elegibilidade

| Critérios de Inclusão (CI)   | Critérios de Exclusão (CE)   |
|--|--|
| <b>CI-1:</b> Artigos de pesquisa empírica, teórica ou numérico-computacional publicados em periódicos com revisão por pares.   | <b>CE-1:</b> Literatura cinzenta ( <i>white papers</i> , relatórios não validados), anais de congressos ( <i>conference proceedings</i> ), teses e capítulos de livros isolados. |
| <b>CI-2:</b> Estudos que modelem explicitamente o acoplamento entre pelo menos duas disciplinas da engenharia (ex.: impacto do <i>pitch control</i> elétrico na fadiga da fundação civil). | <b>CE-2:</b> Estudos unidisciplinares isolados (ex.: apenas fluxo de carga elétrico, ou apenas análise de solo estática) sem interface com o sistema global da turbina.          |
| <b>CI-3:</b> Foco em aerogeradores de eixo horizontal de grande escala (HAWT), <i>onshore</i> ou <i>offshore</i> .   | <b>CE-3:</b> Projetos teóricos de microgeração eólica urbana ou turbinas de eixo vertical (VAWT).  |

## 2.3. Execução do Protocolo de Triagem (PRISMA)

O fluxo de gerenciamento de dados processou-se nas seguintes etapas, com o auxílio do *software* Rayyan (OUZZANI *et al.*, 2016) para a eliminação automática de duplicatas e o mascaramento (*blinding*) das decisões entre os revisores:

1. **Identificação (*Identification*):** Processamento das equações de busca nas quatro bases de dados. Exportação dos metadados e limpeza computacional de registros duplicados.
2. **Triagem Cega (*Screening*):** Avaliação de títulos e resumos. Aplicou-se o filtro inicial eliminando estudos fora do escopo (CE-2 e CE-3). Discrepâncias metodológicas entre os revisores nesta etapa foram resolvidas pela intervenção de um terceiro avaliador sênior.

3. **Elegibilidade de Texto Completo (*Full-text Eligibility*):** Recuperação e leitura integral dos manuscritos retidos. Aderência estrita ao critério CI-2 (exigência de acoplamento multidisciplinar).
4. **Inclusão Final (*Included*):** Consolidação do portfólio definitivo de artigos que compuseram o *corpus* analítico da revisão.

#### 2.4 Protocolo de Extração e Síntese de Dados

A extração dos dados foi tabulada em uma matriz predefinida (planilha estruturada), capturando: (a) autoria e ano; (b) tipo de acoplamento investigado (ex.: Civil-Mecânico, Mecânico-Elétrico); (c) método de otimização (ex.: MDO, Gêmeos Digitais); e (d) principal barreira técnica mitigada.

Em vez de uma sumarização cronológica, os dados extraídos foram submetidos a uma Síntese Temática Narrativa. As evidências foram recategorizadas nos três eixos analíticos que estruturam os resultados deste artigo: Desafios Geotécnicos-Estruturais, Aerodinâmica e Mecânica de Sólidos, e Eletrotécnica e Controle de Rede, revelando as zonas de intersecção crítica.

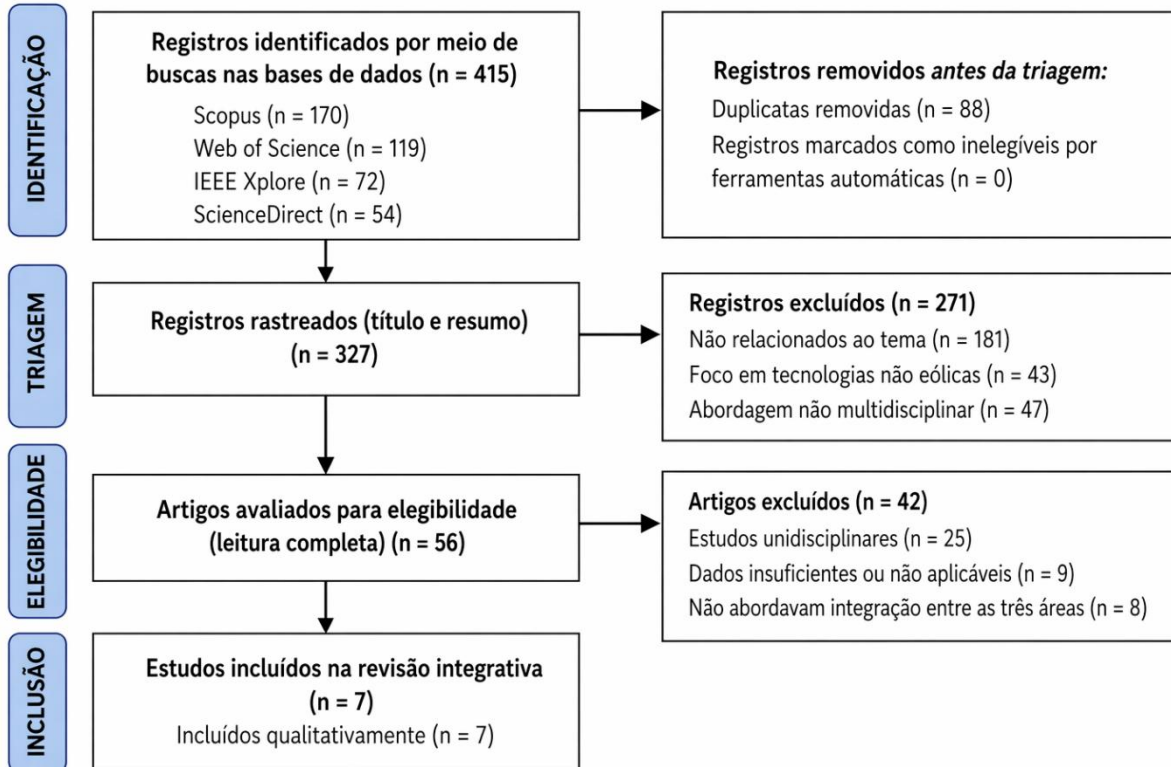
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da estratégia de busca estruturada nas bases de dados Scopus, Web of Science, IEEE Xplore e ScienceDirect resultou na identificação inicial de 415 registros. Após a etapa de deduplicação, na qual foram removidos 88 registros duplicados, permaneceram 327 estudos para triagem por título e resumo. Nessa fase, 271 registros foram excluídos por não atenderem aos critérios de elegibilidade, restando 56 artigos para avaliação em texto completo. A análise integral desses estudos resultou na exclusão de 42 manuscritos, principalmente por ausência de abordagem multidisciplinar ou insuficiência de dados técnicos, culminando na inclusão final de 7 estudos que compuseram o *corpus* analítico desta revisão integrativa. O detalhamento completo das etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão está apresentado no fluxograma PRISMA 2020 (Fluxograma 1).

A síntese dos estudos incluídos revela que os maiores gargalos na implementação de aerogeradores da classe multi-MW residem nas fronteiras entre as disciplinas monodisciplinares. A seguir, os desafios são desmembrados sob a ótica da infraestrutura,

mecânica e sistemas de potência, culminando na evidência de sua interdependência, serão apresentados no quadro 1.

Fluxograma 1: Seleção dos estudos



Quadro 1. Síntese dos estudos.

| Autor(es) / Ano                | Foco Principal do Estudo                                    | Acoplamento Multidisciplinar Modelado                     | Desfecho Técnico / Contribuição  |
|--------------------------------|---|---|--|
| Veers <i>et al.</i> (2023)     | Desafios de <i>Upscaling</i> e Dinâmica de Rotores Gigantes | Aerodinâmica, Dinâmica Estrutural e Rede (MDO Global)     | Demonstra que modelos clássicos de projeto unidisciplinar falham ao prever a fadiga em rotores superflexíveis >15 MW.                              |
| Nejad <i>et al.</i> (2022)     | Tecnologias e Desafios de <i>Drivetrains</i> de Turbinas    | Mecânica (Trem de Potência), Eletrotécnica e Aerodinâmica | Mapeia as falhas decorrentes do acoplamento entre as respostas dinâmicas mecânicas e o controle do gerador em grandes turbinas e <i>offshore</i> . |
| Patryniak <i>et al.</i> (2022) | Turbinas <i>Offshore</i> Flutuantes (FOWT)                  | Hidrodinâmica, Estruturas e Controle Elétrico             | Otimização da estabilidade da plataforma flutuante através do <i>co-design</i> simultâneo do sistema de controle ativo <i>pitch</i> .              |
| Collet <i>et al.</i> (2021)    | Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC)                  | Eletrônica/Controle (Servo) e Mecânica da Fadiga          | Comprova a redução de até 50% das cargas de fadiga ( <i>Damage Equivalent Load</i> ) nas pás, otimizando o desgaste dos atuadores eletromecânicos. |

|                              |   |  |  |
|------------------------------|---|--|--|
| Gambier (2021)               | Estratégias de Controle de Passo ( <i>Pitch Control</i> ) | Eletrotécnica, Mecânica dos Sólidos e Aerodinâmica         | Revisa profundamente como a eletrônica de controle ativo atua no amortecimento vibracional da fundação civil e pás mecânicas.              |
| Meng <i>et al.</i> (2020)    | Otimização de Projeto Multidisciplinar (MDO)              | Mecânica dos Fluidos (CFD) e Estruturas de Suporte         | Aponta que o projeto sequencial isolado gera orçamentos de fadiga hiperconservadores; propõe matrizes integradas de acoplamento numérico.  |
| Jalbi & Bhattacharya (2018)  | Macroelementos em Fundações Monopilha                     | Geotecnia (Solo-Estrutura) e Frequência Natural (Mecânica) | Desenvolve método preditivo avançado para evitar o fenômeno de ressonância mecânica do rotor com as camadas do subsolo oceânico.           |
| Ashuri <i>et al.</i> (2014)* | Otimização MDO para Minimização do LCOE                   | Engenharia Civil (Torre/Fundações) e Aerodinâmica          | Estudo seminal (mantido como <i>benchmark</i> histórico) que quantificou a redução estrutural do Custo Nivelado de Energia (LCOE) via MDO. |

## I. Infraestrutura Civil e Geotecnia: A Dinâmica da Interação Solo-Estrutura (SSI)

Historicamente, o projeto civil de parques eólicos tratava a torre e a fundação como estruturas predominantemente passivas, dimensionadas para suportar cargas gravitacionais e impulsos eólicos extremos padronizados. Contudo, com o escalonamento dos rotores para diâmetros superiores a 150 metros, as cargas atuantes deixaram de ser estáticas e tornaram-se severamente dinâmicas, cíclicas e estocásticas (MENG *et al.*, 2020).

A literatura recente demonstra que a abordagem sequencial tradicional — onde a Engenharia Mecânica define as cargas aerodinâmicas e as repassa à Engenharia Civil para o dimensionamento da fundação — está tecnicamente esgotada. Ashuri *et al.* (2014), em seu estudo seminal sobre Otimização de Projeto Multidisciplinar (MDO), comprovaram que essa segregação gera orçamentos de fadiga hiperconservadores, resultando em superdimensionamento de materiais (aço e concreto) que inviabiliza a redução do Custo Nivelado de Energia (LCOE). Ao acoplar a aerodinâmica do rotor com a flexibilidade estrutural da torre desde a fase conceitual, é possível otimizar a distribuição de massa sem comprometer a confiabilidade.

O desafio mais crítico, no entanto, reside na fronteira geotécnica: a Interação Solo-Estrutura (SSI - *Soil-Structure Interaction*). Jalbi e Bhattacharya (2018) modelaram esse fenômeno utilizando a abordagem de macroelementos para fundações (como as estacas monopilha em ambientes *offshore* e sapatas profundas *onshore*). O ponto nevrálgico do projeto civil moderno é garantir que a frequência natural da estrutura global ( $f_n$ ) não entre em

ressonância com as frequências de excitação do sistema mecânico, especificamente a frequência rotacional do rotor ( $1P$ ) e a frequência de passagem das pás pela torre ( $3P$ ).

Essa degradação geotécnica temporal provoca o rebaixamento da frequência natural da estrutura ao longo dos anos. Se a frequência civil ( $f_n$ ) cair e se aproximar da frequência mecânica ( $1P$ ), o sistema entra em quase-ressonância. O resultado dessa falha civil é sentido diretamente nos componentes mecânicos lá no topo: o excesso de vibração propaga-se pela torre, desalinhando os eixos do trem de potência, acelerando o desgaste da caixa de engrenagens (*gearbox*) e exigindo que o sistema elétrico de *pitch* (passo das pás) trabalhe em sobrecarga para amortecer a oscilação da nacelle (MENG *et al.*, 2020).

Portanto, a viabilidade da infraestrutura civil moderna depende intrinsecamente do conhecimento profundo das cargas aerodinâmicas não-lineares e da capacidade do sistema mecânico de mitigar vibrações que chegariam à fundação.

## 2. Aerodinâmica e Mecânica dos Sólidos: O Limite da Aeroelasticidade e o Controle Ativo

Com o contínuo *upscaling* dos aerogeradores para potências superiores a 15 MW, os rotores atingiram diâmetros colossais que desafiam as premissas clássicas do projeto mecânico. Segundo Veers *et al.* (2023), a busca pela maximização da área varrida resultou na fabricação de pás extremamente delgadas, longas e, conseqüentemente, superflexíveis. Nesse cenário, o comportamento aerodinâmico deixa de operar sob a hipótese de "corpos rígidos" e adentra o complexo e não-linear domínio da aeroelasticidade.

As cargas do vento induzem deformações flexionais e torcionais nas pás que, por sua vez, alteram instantaneamente o seu ângulo de ataque aerodinâmico local. Essa interação cria um ciclo de *feedback* dinâmico (acoplamento fluido-estrutura) que os modelos unidisciplinares tradicionais são incapazes de prever com exatidão (VEERS *et al.*, 2023). Quando essas vibrações aeroelásticas não são mitigadas, elas se acoplam às cargas assimétricas geradas pelo cisalhamento do vento (*wind shear*) e propagam-se severamente por todo o trem de potência (*drivetrain*). O resultado prático é a transferência de uma fadiga não-prevista para o eixo principal, mancais e, fatalmente, para a caixa de engrenagens (*gearbox*), o componente com maior índice de falhas críticas na operação *offshore*.

Para evitar o colapso mecânico sob essas condições extremas de estresse, a engenharia de materiais atinge o seu limite de custo-benefício. A solução contemporânea deixou de ser o

reforço estrutural passivo (adicionar mais massa e rigidez) e passou a ser a mitigação ativa, exigindo uma integração visceral com a Engenharia Elétrica e de Controle.

A sobrevivência da estrutura mecânica e aerodinâmica das modernas turbinas eólicas tornou-se totalmente dependente da intervenção em tempo real de sistemas eletroeletrônicos, com destaque para os sistemas de controle de passo (*Pitch Control*) (GAMBIER, 2021).

Gambier (2021) demonstra, em sua extensa revisão, que o controle de passo não atua apenas na limitação da potência nominal em ventos fortes, mas funciona como o principal sistema de amortecimento de vibrações sistêmicas do aerogerador. Através de malhas de controle avançadas, como o *Individual Pitch Control* (IPC), servomotores elétricos ou atuadores hidráulicos ajustam o ângulo de cada pá de forma independente, várias vezes por segundo, à medida que elas cruzam o rotor. Esse movimento contínuo "fatia" as rajadas de vento, anulando o desbalanceamento de cargas antes que elas atinjam a torre civil e o trem de potência mecânico.

No entanto, essa sinergia cria um novo gargalo de interface: o projeto mecânico dos rolamentos das pás passa a ser estritamente ditado pela agressividade do algoritmo de controle (GAMBIER, 2021). Um sistema eletrônico que altere o ângulo de passo excessivamente para salvar a fundação e a caixa de engrenagens da fadiga acabará destruindo, por atrito e desgaste acelerado (tribologia), os rolamentos mecânicos do próprio sistema de *pitch*.

10

Dessa forma, a literatura evidencia que a fronteira do projeto mecânico e aerodinâmico não pode ser superada sem a otimização conjunta do condicionamento de sinais e da eletrônica de potência, configurando a transição obrigatória para a análise dos sistemas elétricos e de integração à rede.

### 3. Sistemas de Potência e Controle: A Eletrônica como Elo de Estabilidade

À medida que as turbinas eólicas transcendem as fronteiras da estabilidade aerodinâmica e civil, o ônus da confiabilidade operacional é transferido para os sistemas eletrotécnicos e de controle. A literatura demonstra que a mitigação da fadiga estrutural só é viável através da atuação contínua da eletrônica de potência e de sofisticadas malhas de controle servomecânico (COLLET *et al.*, 2021). O aerogerador moderno não é mais uma máquina rotativa passiva, mas um robô gigantesco, altamente acoplado, que toma decisões em milissegundos para proteger sua própria integridade física.

No núcleo dessa transição está o Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC - *Model Predictive Control*). Collet *et al.* (2021) evidenciam que o uso de controladores orientados à fadiga,

alimentados por dados em tempo real, consegue prever a incidência de rajadas assimétricas e alterar o torque do gerador e o ângulo de passo antes que a carga destrutiva atinja o trem de potência. A implementação bem-sucedida dessas estratégias eletroeletrônicas tem o potencial de reduzir as Cargas Equivalentes de Dano (DEL - *Damage Equivalent Loads*) nas pás em até 50%.

Contudo, essa intervenção elétrica cria novos e severos desafios de integração. Para proteger a infraestrutura e mitigar as oscilações, os atuadores do *pitch* (passo) operam de forma ininterrupta e agressiva, o que demanda um consumo interno de energia (parasítico) considerável e introduz transitórios severos no gerador. O conversor pleno (*full converter*) passa a ser exigido de forma dupla: deve amortecer as flutuações de potência mecânica originadas do rotor e, simultaneamente, garantir que a energia injetada na rede atenda aos rigorosos códigos de rede (*grid codes*), mantendo a frequência e a tensão estáveis mesmo sob distúrbios contínuos.

A complexidade atinge seu ápice nas Turbinas Eólicas *Offshore* Flutuantes (FOWT). Conforme elucidado por Patryniak *et al.* (2022), em estruturas flutuantes, a separação monodisciplinar causa instabilidades catastróficas. Se o sistema de controle elétrico for projetado apenas para otimizar a extração de energia (foco elétrico clássico), ele pode introduzir um empuxo aerodinâmico negativo que entra em ressonância com o movimento hidrodinâmico das ondas, provocando o capotamento da estrutura civil-naval. Nesses sistemas, o co-design é obrigatório: o controle eletrônico do torque do gerador e do passo das pás deve ser parametrizado não apenas pela aerodinâmica, mas pelo comportamento das amarras e da plataforma flutuante.

11

Portanto, a viabilidade dos sistemas de potência em grandes parques eólicos depende da transição de lógicas de controle reativas para lógicas preditivas co-projetadas (MDO). O sistema elétrico converte-se no verdadeiro amortecedor entre a violência das forças ambientais (vento/ondas), a fragilidade das estruturas de suporte civis e a rigidez exigida pelas redes de transmissão interligadas.

#### 4. A Sinergia Multidisciplinar: Otimização de Projeto e Gêmeos Digitais

A análise isolada das frentes de infraestrutura, mecânica de fluidos/sólidos e controle elétrico revela que os gargalos tecnológicos que limitam a expansão e a rentabilidade dos modernos complexos eólicos ocorrem, invariavelmente, nas zonas de interface disciplinar. Para superar o limiar de viabilidade das turbinas multi-MW e das plataformas flutuantes (*offshore*), a engenharia deve abandonar definitivamente os fluxos de trabalho sequenciais.

A literatura consolida a Otimização de Projeto Multidisciplinar (MDO - *Multidisciplinary Design Optimization*) como o arcabouço metodológico obrigatório para a próxima geração de aerogeradores. Conforme detalhado por Meng *et al.* (2020), o MDO substitui a mitigação reativa de falhas por um co-projeto matemático simultâneo. Por meio dessa abordagem, uma restrição geotécnica (como a degradação da rigidez do solo sob cargas cíclicas) é parametrizada no mesmo algoritmo que define a aerodinâmica das pás e a agressividade do conversor elétrico. O resultado não é a turbina mais leve ou o gerador mais potente, mas o sistema global com o menor Custo Nivelado de Energia (LCOE) e a maior sobrevida à fadiga (ASHURI *et al.*, 2014).

Em ambientes extremos, como no caso das Turbinas Eólicas Flutuantes (FOWT), essa sinergia passa de uma ferramenta de otimização de custos para um pré-requisito de estabilidade estática e dinâmica. Patryniak *et al.* (2022) demonstram que o co-design de controle é a única via para harmonizar as frequências hidrodinâmicas das ondas com a atuação dos servomotores elétricos de passo, evitando que as forças aerodinâmicas induzam o colapso da amarração civil-naval.

Adicionalmente, a fronteira de pesquisa, conforme proposta por Veers *et al.* (2023), aponta para a digitalização integral do ciclo de vida através dos Gêmeos Digitais (*Digital Twins*). Esses modelos virtuais representam a materialização da sinergia em tempo real: eles fundem dados de Monitoramento de Saúde Estrutural (SHM) da fundação civil, espectros de vibração da caixa de engrenagens mecânica e os dados de potência instantânea (SCADA) do sistema elétrico. Alimentados por Inteligência Artificial e Controle Preditivo Baseado em Modelo (COLLET *et al.*, 2021), os Gêmeos Digitais permitem que o controlador elétrico reconfigure dinamicamente o *setpoint* da turbina caso detecte que a fundação geotécnica está entrando em fadiga prematura, sacrificando eficiência elétrica em prol da integridade estrutural.

Infere-se, portanto, que o sucesso de um parque eólico moderno depende de uma arquitetura de controle que "compreenda" a física estrutural, montada sobre uma fundação projetada para prever o comportamento agressivo da eletrônica de potência sob estresse aerodinâmico.

## CONCLUSÃO

O imperativo global de descarbonização exige que a energia eólica continue escalonando seus limites operacionais e dimensionais. No entanto, esta revisão integrativa demonstra que a

concretização de complexos eólicos robustos e economicamente viáveis não é mais uma questão de avanço monodisciplinar, mas de integração sistêmica profunda. A análise do estado da arte revela uma cadeia de dependência crítica na qual a infraestrutura, a aerodinâmica e os sistemas de potência operam em um regime de acoplamento indissociável.

No plano estrutural, infere-se que a integridade das fundações civis transcende o mero suporte estático gravitacional, sendo estritamente ditada pela complexa Interação Solo-Estrutura (SSI). A degradação cíclica dessa fronteira geotécnica é induzida diretamente pelas vibrações de rotores colossais operando em regime aeroelástico não-linear. Simultaneamente, o escalonamento das pás exauriu as abordagens mecânicas clássicas de reforço passivo de materiais, tornando a sobrevivência do trem de potência intrinsecamente dependente da intervenção ativa de servomecanismos. É exatamente neste ponto de estrangulamento mecânico-estrutural que a engenharia elétrica se consolida como o elo vital de viabilidade do aerogerador. A eletrônica de potência e os algoritmos de controle avançado — como o controle de passo preditivo e os conversores plenos — atuam não apenas na mitigação de transitórios para atender aos códigos de rede, mas operam como os verdadeiros amortecedores ativos responsáveis por proteger a estrutura civil e as engrenagens contra o colapso por fadiga prematura.

Conclui-se, portanto, que o projeto e a implementação de complexos eólicos da classe multi-MW demandam uma ruptura definitiva com a cultura de silos da engenharia. O avanço sustentável da indústria está ancorado na adoção mandatória de arquiteturas metodológicas combinadas, notadamente a Otimização de Projeto Multidisciplinar (MDO) e o monitoramento via Gêmeos Digitais (*Digital Twins*). Apenas a predição e o controle simultâneos dos fenômenos aero-servo-hidro-elásticos permitirão quantificar o ciclo de vida real das máquinas, reduzir o conservadorismo estrutural e garantir a segurança operacional e financeira necessária para a consolidação global das tecnologias eólicas de nova geração.

### **Conflitos de Interesse**

Os autores declaram que não existem conflitos de interesse financeiros ou pessoais que possam ter influenciado inadequadamente o desenvolvimento desta pesquisa.

### **Financiamento**

A presente pesquisa não recebeu auxílio financeiro específico de agências de fomento públicas ou privadas.

## REFERÊNCIAS

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL (GWEC). *Global Wind Report 2024*. Bruxelas: GWEC, 2024.

HONG, Q. N. et al. The Mixed Methods Appraisal Tool (MMAT) version 2018 for information professionals and researchers. *Education for Information*, v. 34, n. 4, p. 285–291, 2018.

OUZZANI, M. et al. Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, v. 5, n. 1, p. 210, 2016. DOI: 10.1186/s13643-016-0384-4.

PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, v. 10, n. 1, p. 89, 2021. DOI: 10.1186/s13643-021-01626-4.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. *Journal of Advanced Nursing*, v. 52, n. 5, p. 546–553, 2005. DOI: 10.1111/j.1365-2648.2005.03621.x.

ASHURI, T. et al. Multidisciplinary design optimization of offshore wind turbines for minimum levelized cost of energy. *Renewable Energy*, v. 68, p. 893–905, 2014. DOI: 10.1016/j.renene.2014.02.045.

COLLET, D. et al. Data-driven fatigue-oriented MPC applied to wind turbines individual pitch control. *Renewable Energy*, v. 170, p. 1008–1019, 2021. DOI: 10.1016/j.renene.2021.02.052.

GAMBIER, A. Pitch control of three-bladed large wind energy converters: a review. *Energies*, v. 14, n. 23, p. 8083, 2021. DOI: 10.3390/en14238083.

JALBI, S.; BHATTACHARYA, S. Concept design of monopile supported offshore wind turbine by a macro-element approach. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 115, p. 1–18, 2018. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.08.002.

MENG, H. et al. Review on multidisciplinary design optimization of wind turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 133, p. 110184, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110184.

PATRYNIAK, K.; COLLU, M.; CORADDU, A. Multidisciplinary design analysis and optimisation frameworks for floating offshore wind turbines: state of the art. *Ocean Engineering*, v. 251, p. 111002, 2022. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111002.

VEERS, P. et al. Grand challenges in the design, manufacture, and operation of future wind turbine systems. *Wind Energy Science*, v. 8, n. 7, p. 1071–1131, 2023. DOI: 10.5194/wes-8-1071-2023.

VEERS, P. et al. Grand challenges: wind energy research needs for a global energy transition. *Wind Energy Science*, v. 7, n. 6, p. 2491–2521, 2022. DOI: 10.5194/wes-7-2491-2022.

DIRSCHERL, C.; HACKL, C. M.; SCHECHNER, K. Modeling and control of modern wind turbine systems: an introduction. *arXiv preprint*, 2017. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1703.08661>.

EJUH, E. et al. The impact of integrating variable renewable energy sources into grid-connected power systems. *Energies*, v. 18, n. 3, p. 689, 2025. DOI: 10.3390/en18030689.

GUÉRINEAU, J. et al. Towards a design-method selection framework for multidisciplinary product development. In: *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE*, 2018. Proceedings [...]. 2018. DOI: 10.21278/idc.2018.0431.

KUIK, G. A. M. et al. Long-term research challenges in wind energy – a research agenda. *Wind Energy Science*, v. 1, n. 1, p. 1–39, 2016. DOI: 10.5194/wes-1-1-2016.

NOUNANGNONHOU, C. T. et al. Design optimization of a lattice tower: structure and foundations. *Open Journal of Applied Sciences*, v. 14, n. 2, p. 483, 2024. DOI: 10.4236/ojapps.2024.142035.

ULSOY, A. G.; GALIP, A. *Frontiers of Mechanical Engineering*. [S.l.]: Springer, 2013.