

Efeitos de Vibrações em Turbinas Eólicas Instaladas em Edifícios ou Plataformas Offshore: Análise Estrutural e de Fadiga

Gustavo Lacerda Cardoso
Gustavo.lacerda@aluno.ifsp.edu.br

José Bonsaver Neto
Bonsaver.j@aluno.ifsp.edu.br

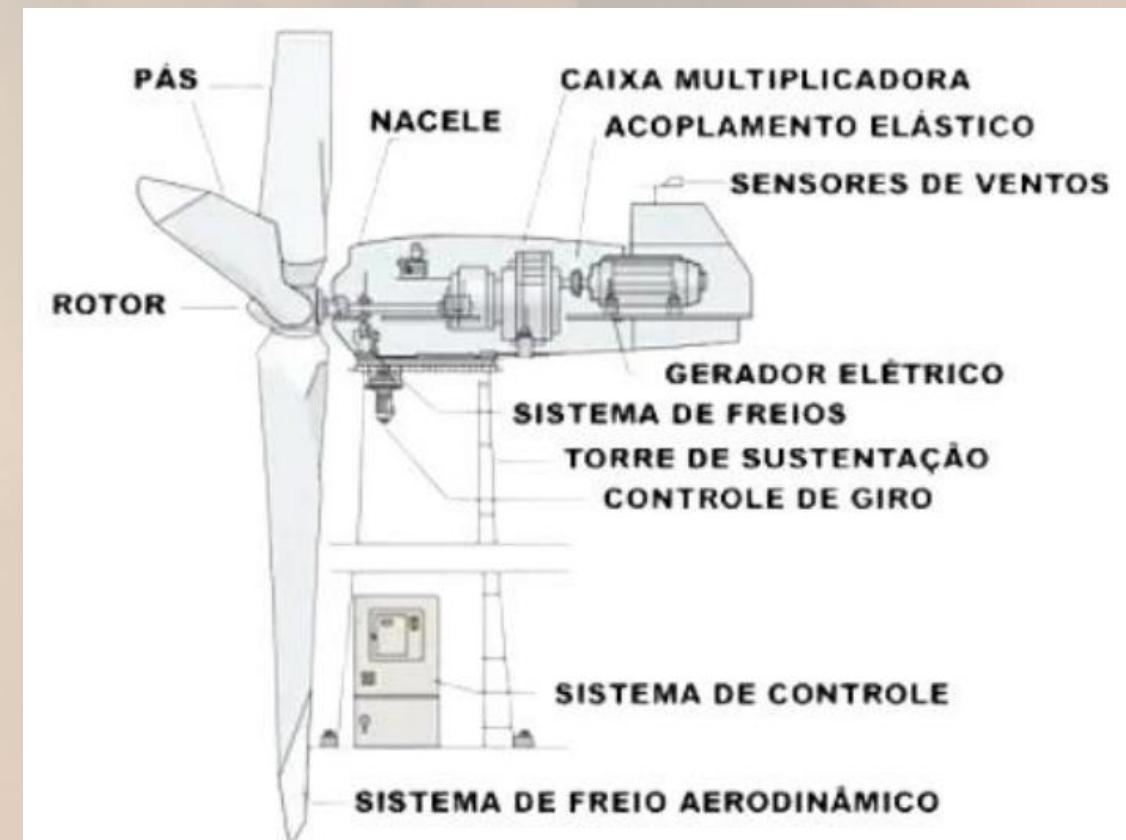


Introdução

As turbinas eólicas instaladas em ambientes urbanos e offshore estão sujeitas a intensas vibrações decorrentes de ventos turbulentos, ondas, correntes marítimas e cargas operacionais. Essas vibrações, quando não analisadas adequadamente, reduzem a vida útil, afetam a segurança e elevam os riscos operacionais. O artigo explora conceitos de dinâmica estrutural, ressonância, análise modal, fadiga e metodologias numéricas como o MEF, propondo uma abordagem completa para projetar e monitorar turbinas com maior confiabilidade.

Como Funciona uma Turbina Eólica

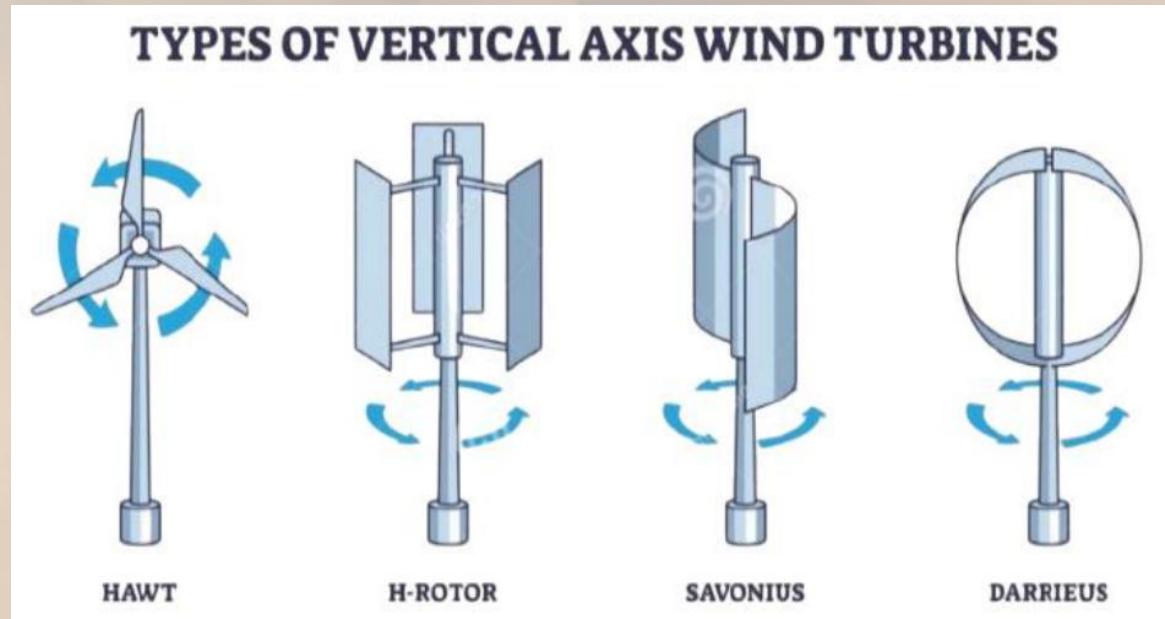
A turbina eólica transforma a energia do vento em eletricidade por meio da rotação das pás, que acionam o eixo principal e o gerador localizado na nacelle. Componentes como torre, hub, fundação e sistemas de yaw e pitch garantem estabilidade e eficiência. O funcionamento depende da interação entre aerodinâmica, mecânica e estrutura, tornando a análise dinâmica essencial para prevenir vibrações excessivas.





Tipos de Turbinas

As turbinas HAWT, de eixo horizontal, são as mais comuns e eficientes, porém dependem da orientação ao vento. Já as turbinas VAWT — como H-Rotor, Savonius e Darrieus — captam vento de qualquer direção, sendo adequadas a ambientes urbanos com turbulência intensa. Embora menos eficientes, possuem vantagens como simplicidade e operação silenciosa.



Aplicações em Edifícios e Offshore

Instalações em edifícios enfrentam ventos irregulares e turbulentos, exigindo análise da interação com a estrutura para evitar desconforto ou danos. Já plataformas offshore recebem ventos fortes e cargas cíclicas de ondas e correntes, tornando o ambiente mais severo e complexo. A dinâmica fluido–estrutura é essencial para garantir a segurança em alto-mar.





Fontes de Vibração

As vibrações surgem de fenômenos como desbalanceamento das pás, passagem das pás pela torre (efeito torre-shadow), vibrações do trem de força e frequências de rotação (1P e 3P). Além disso, turbulência, rajadas, desprendimento de vórtices e, no caso offshore, ondas e correntes marítimas reforçam a excitação dinâmica, exigindo controle cuidadoso no projeto; vamos dividir em três áreas .

Aerodinâmicas

- Desbalanceamento das pás
- Tower-shadow (3P)
- Turbulência e rajadas
- Desprendimento de vórtices
- Aeroelasticidade (stall, flutter)

Mecânicas

- Vibrações do trem de força (drive-train)
- Desgaste de engrenagens
- Folgas e desalinhamentos
- Vibrações do gerador
- Ruído estrutural interno

Ambientais / Offshore

- Ondas e correntes marítimas
- Cargas combinadas vento–onda
- Amortecimento hidrodinâmico
- Interação fluido–estrutura
- Variação de rigidez da fundação

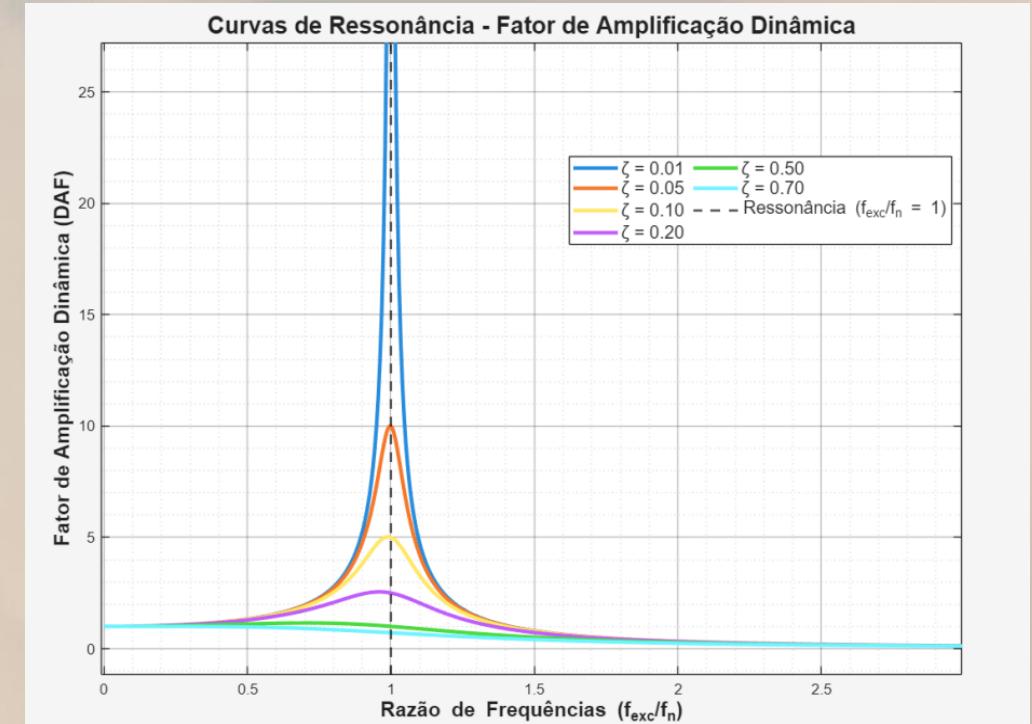


Ressonância e DAF

 Quando a frequência de excitação se aproxima da frequência natural da torre, ocorre ressonância, aumentando drasticamente as amplitudes de vibração. O Fator de Amplificação Dinâmica (DAF) quantifica essa amplificação. Projetos precisam manter as frequências naturais longe das faixas 1P, 3P e das ondas para evitar danos estruturais.

O **Fator de Amplificação Dinâmica (DAF)** quantifica o quanto a resposta dinâmica real é maior que a resposta estática (ignorando os efeitos dinâmicos). Para um sistema de 1-GL sob excitação harmônica, o DAF é dado por:

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{\left[\left(1 - \left(\frac{f_{ex}c}{f_n} \right)^2 \right)^2 + \left(2\zeta \left(\frac{f_{ex}c}{f_n} \right) \right)^2 \right]}}$$



Onde:

$f_{ex}c$: frequência da força de excitação [Hz]

f_n : frequência natural do sistema [Hz]

ζ : razão de amortecimento (adimensional)

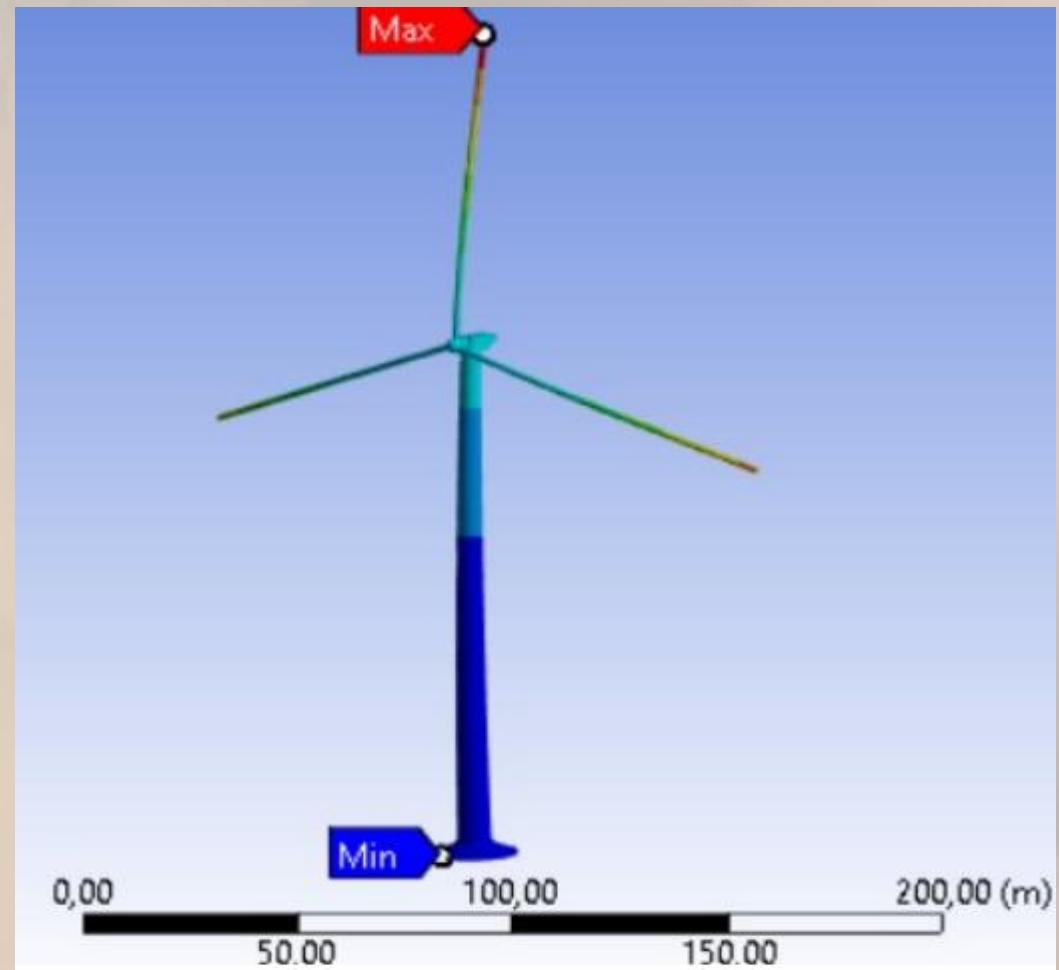


Análise Modal e MEF

A O Método dos Elementos Finitos (MEF)

complementa essa etapa ao possibilitar a modelagem detalhada da torre, das pás, da nacelle, da fundação e de suas interações. Por meio do MEF, é possível obter **tensões, deformações, deslocamentos, acelerações**, além de analisar regiões críticas como soldas, flanges, transições estruturais e pontos de concentração de esforços.

A combinação entre análise modal e MEF é indispensável para prever **comportamentos dinâmicos reais**, avaliar os efeitos da interação com vento e ondas, verificar a integridade estrutural ao longo da vida útil e orientar tanto o **dimensionamento de componentes** quanto as **estratégias de mitigação e monitoramento**.





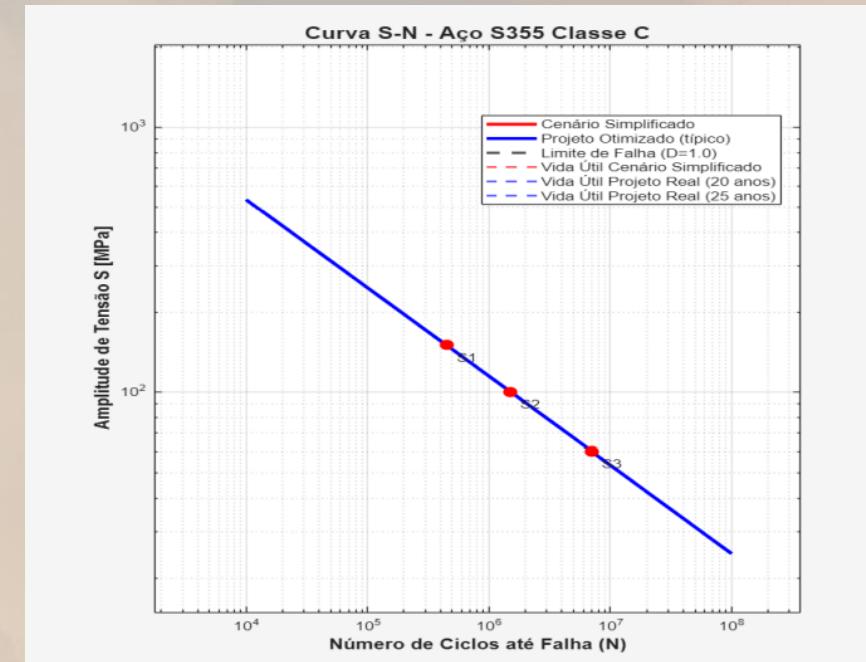
Interação com o Meio

-  Em edifícios, o comportamento do vento é amplamente influenciado pela geometria urbana. A presença de outras estruturas provoca **turbulência intensa, canalização dos fluxos**, redirecionamento e aceleração do escoamento, resultando em carregamentos altamente variáveis. Essas excitações podem gerar vibrações desconfortáveis para ocupantes, além de aumentar tensões na base e nas ligações entre turbina e edifício. A combinação entre as vibrações da turbina e a flexibilidade natural da edificação exige uma avaliação detalhada da **interação vento–estrutura–edifício**.
-  No ambiente **offshore**, a interação fluido–estrutura é um dos fatores mais determinantes no comportamento dinâmico da turbina. A presença da água introduz **massa adicional (added mass)**, que aumenta a inércia efetiva da estrutura e reduz suas frequências naturais. Além disso, o **arrasto** e o **amortecimento hidrodinâmico** dissipam energia e atenuam as vibrações, mas também impõem **cargas cíclicas significativas** oriundas das ondas e correntes marítimas. Essas forças variam continuamente e podem se combinar com a ação do vento, exigindo análises acopladas para prever a resposta real da torre e da fundação.



Fadiga e Vida Útil

A fadiga ocorre devido a ciclos repetitivos de tensão, mesmo quando inferiores ao limite de escoamento. Métodos como Palmgren-Miner e curvas S-N estimam o acúmulo de dano, enquanto o Rainflow Counting converte sinais variáveis em ciclos equivalentes. Tensões médias também afetam o limite de fadiga e devem ser consideradas no dimensionamento.





Riscos De Falha



Falhas por vibração e fadiga podem causar colapso da turbina, queda de componentes e danos ambientais, especialmente offshore, onde vazamentos podem afetar a vida marinha. Financeiramente, resultam em perda do ativo, interrompem a produção e elevam drasticamente o custo de manutenção. O acidente da plataforma Alexander Kielland evidencia a gravidade do problema.

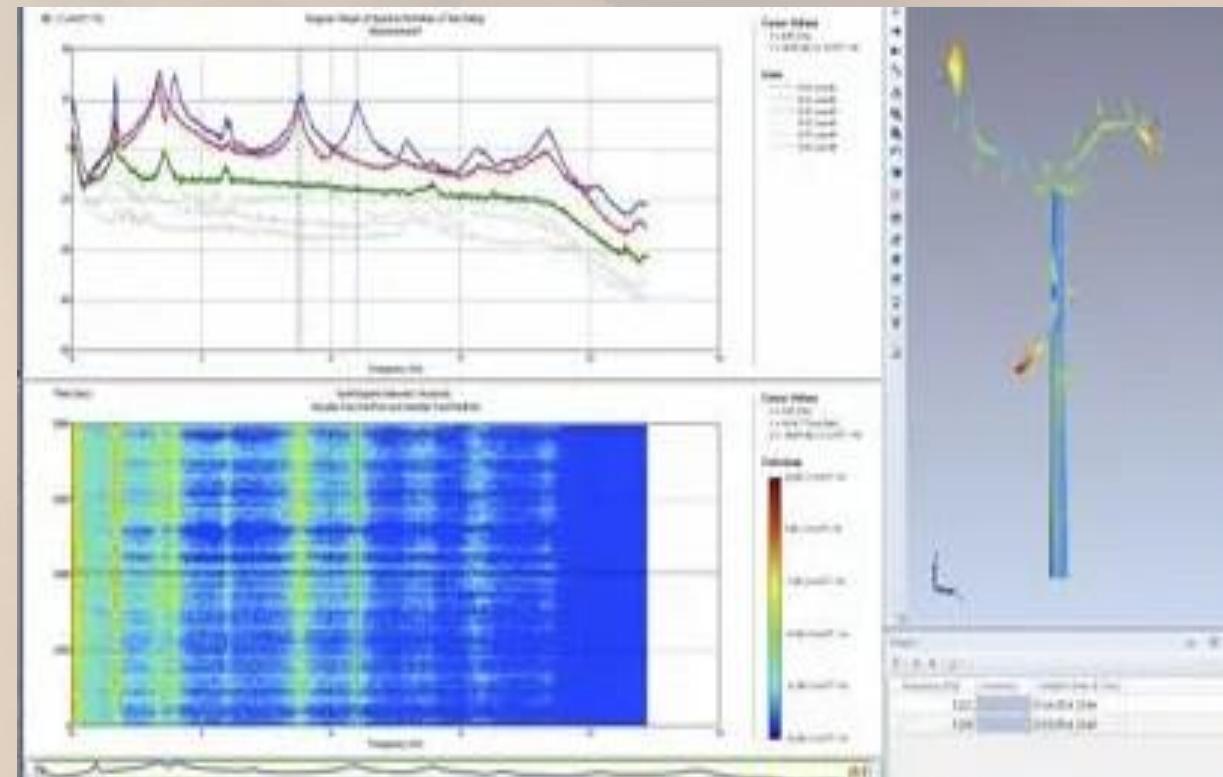




Monitoramento e Mitigação



O SHM monitora em tempo real o comportamento estrutural da turbina, identificando variações em frequências naturais, tensões, deformações e microtrincas. Sensores como acelerômetros, strain gauges, fibra óptica, inclinômetros e emissão acústica detectam danos iniciais. Essas informações alimentam rotinas de **análise modal operacional (OMA)**, algoritmos de detecção de anomalias e sistemas de manutenção preditiva, permitindo intervenções antecipadas. Combinado a inspeções e ensaios não destrutivos, o SHM aumenta a confiabilidade, reduz paradas não programadas, melhora a segurança e prolonga a vida útil da turbina, especialmente em ambientes offshore.



Estudo de Caso: SG 14-222 DD



A turbina Siemens Gamesa 14 MW apresenta frequências naturais projetadas para evitar 1P e 3P, garantindo segurança dinâmica. O amortecimento offshore reduz o DAF e mitiga vibrações. A análise simplificada de fadiga demonstra como tensões cíclicas podem acelerar falhas se não forem tratadas com critérios realistas de projeto.

Turbina Offshore Siemens Gamesa SG 14-222 DD:

Potência Nominal: 14 MW

Diâmetro do Rotor: 222 m

Altura do Cubo (Hub Height): 108 m

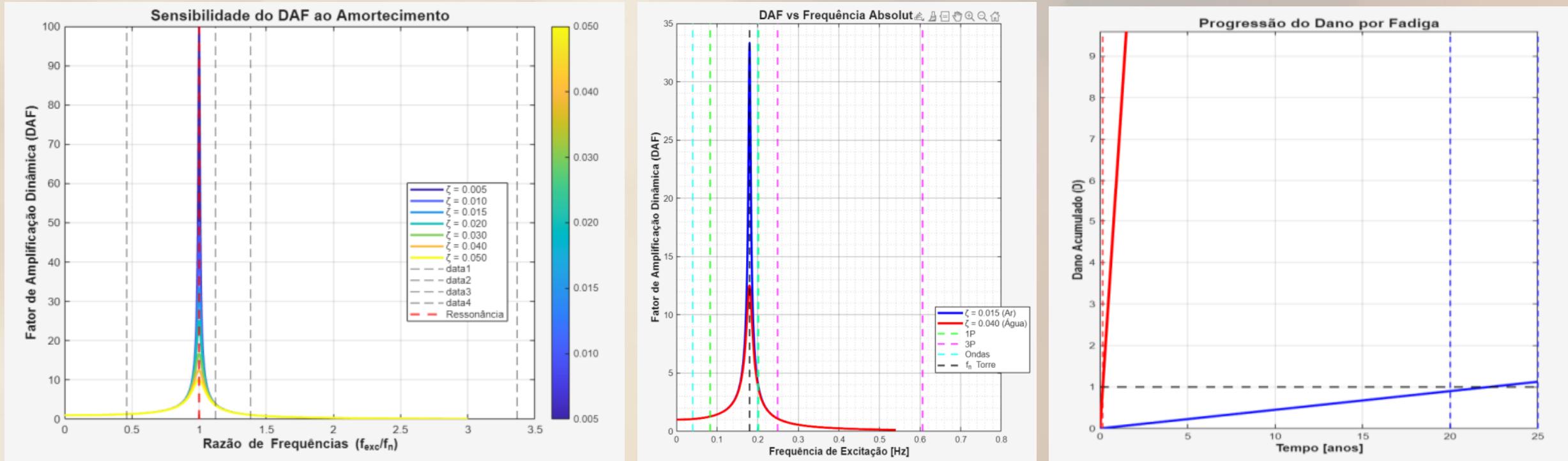
Massa da Nacelle: 500 toneladas

Velocidade de Rotação Nominal: 5,0 – 12,1 rpm

Área de Varredura do Rotor: 39.000 m²



Estudo de Caso: SG 14-222 DD





Conclusões

 As vibrações e a fadiga desempenham papel decisivo na durabilidade, no desempenho e na segurança de turbinas eólicas instaladas tanto em edifícios quanto em ambientes offshore. A combinação entre análise modal, MEF e monitoramento contínuo permite identificar riscos de ressonância, estimar tensões críticas e orientar soluções estruturais mais eficientes. A integração de sistemas SHM, associada ao uso de normas técnicas e práticas de engenharia avançadas, garante maior confiabilidade operacional, reduz falhas e sustenta a vida útil da turbina ao longo de todo o ciclo de operação.

Obrigado Pela Atenção

