

Revista Eletrônica



Volume 5 – Número 1 - 2025

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

Gustavo Lacerda Cardoso

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

gustavo.lacerda@aluno.ifsp.edu.br

José Bonsaver Neto

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo

bonsaver.j@aluno.ifsp.edu.br

Resumo

Este artigo investiga os complexos efeitos das vibrações em turbinas eólicas instaladas tanto em ambientes offshore quanto no topo de edifícios, com um foco aprofundado na análise estrutural e de fadiga. Serão detalhadas as fontes de vibração, desde operacionais a ambientais, e a sua influência crítica na integridade e vida útil das estruturas. A metodologia aborda desde a fundamentação teórica das vibrações, incluindo equações diferenciais do movimento e análise modal, até a aplicação de métodos numéricos como o Elementos Finitos (MEF). Particular ênfase é dada à análise de fadiga, utilizando a regra de Palmgren-Miner e abordagens avançadas como Rainflow Counting e efeitos de tensão média, cruciais para a previsão da durabilidade sob carregamentos cíclicos. Os riscos operacionais, ambientais e financeiros associados a falhas por vibração e fadiga são discutidos, culminando na apresentação de sistemas de Monitoramento da Saúde Estrutural (SHM) e estratégias de mitigação. O objetivo é consolidar o conhecimento sobre a dinâmica dessas estruturas e propor uma abordagem robusta para seu projeto, monitoramento e manutenção, com base em dados realistas e normas técnicas aplicáveis.

Palavras-chave

Vibrações, Turbinas Eólicas, Análise Estrutural, Fadiga, Offshore, Edifícios, SHM, MEF, Ressonância.

Abstract

This article investigates the complex effects of vibrations on wind turbines installed in both offshore environments and on building rooftops, with an in-depth focus on structural and fatigue analysis. Vibration sources, from operational to environmental, and their critical influence on the integrity and lifespan of the structures will be detailed. The methodology covers from the theoretical foundation of vibrations, including differential equations of motion and modal analysis, to the application of numerical

methods such as the Finite Element Method (FEM). Particular emphasis is given to fatigue analysis, using the Palmgren-Miner rule and advanced approaches like Rainflow Counting and mean stress effects, crucial for predicting durability under cyclic loading. The operational, environmental, and financial risks associated with vibration and fatigue failures are discussed, culminating in the presentation of Structural Health Monitoring (SHM) systems and mitigation strategies. The objective is to consolidate knowledge about the dynamics of these structures and propose a robust approach for their design, monitoring, and maintenance, based on realistic data and applicable technical standards.

Palavras-chave

Vibrations, Wind Turbines, Structural Analysis, Fatigue, Offshore, Buildings, SHM, FEM, Resonance.

1 - Introdução

A crescente demanda global por fontes de energia renovável tem impulsionado a rápida evolução e expansão da energia eólica. Essa expansão tem levado à instalação de turbinas eólicas em ambientes cada vez mais desafiadores, como vastas plataformas offshore e, em menor escala, no topo de edifícios urbanos.

Embora representem uma solução promissora para a geração de energia limpa, essas estruturas estão inherentemente sujeitas a carregamentos dinâmicos severos que induzem vibrações constantes. Essas vibrações, se não adequadamente compreendidas e mitigadas, podem comprometer seriamente a integridade estrutural, a segurança operacional e a vida útil das turbinas e de suas estruturas de suporte, principalmente através do mecanismo de fadiga.

Este artigo visa aprofundar a compreensão dos efeitos das vibrações em turbinas eólicas, com uma abordagem técnica rigorosa.

Exploraremos os princípios fundamentais da dinâmica estrutural, as metodologias avançadas para análise de fadiga, os sistemas de monitoramento em tempo real e as estratégias de mitigação, com o objetivo de fornecer uma visão abrangente para o projeto e a manutenção seguros e eficientes dessas complexas estruturas.

2 – Fundamentação Teórica das Vibrações em Turbinas Eólicas

A compreensão do comportamento vibracional de turbinas eólicas exige uma base sólida em dinâmica estrutural. As vibrações são respostas a forças dinâmicas, e sua análise é crucial para evitar falhas catastróficas.

2.1 - O que é uma Turbina Eólica e como funciona

Uma turbina eólica é um dispositivo mecânico que converte a energia cinética do vento em energia elétrica. Sua estrutura básica consiste em:

Pás do Rotor: Geralmente três, capturam a energia do vento e giram em torno de um cubo (hub).

Cubo (Hub): Conecta as pás ao eixo de baixa velocidade.

Nacelle: Abriga os componentes mais importantes do sistema de geração de energia, como o gerador, a caixa de engrenagens (se presente), o sistema de controle de passo (pitch control) e o sistema de orientação (yaw control).

Torre: Estrutura vertical que eleva a nacelle e o rotor a uma altura onde os ventos são mais fortes e consistentes, transmitindo as cargas para a fundação.

Fundação: Ancoragem da torre ao solo ou à estrutura de suporte.

O processo de geração de energia inicia-se quando o vento faz as pás girarem. Essa rotação é transmitida ao eixo principal, que, por sua vez, aciona o gerador. Em turbinas com caixa de engrenagens, a rotação do eixo principal (baixa velocidade) é acelerada para a velocidade operacional do gerador (alta velocidade). Finalmente, o gerador converte a energia mecânica em energia elétrica, que é então condicionada e injetada na rede.

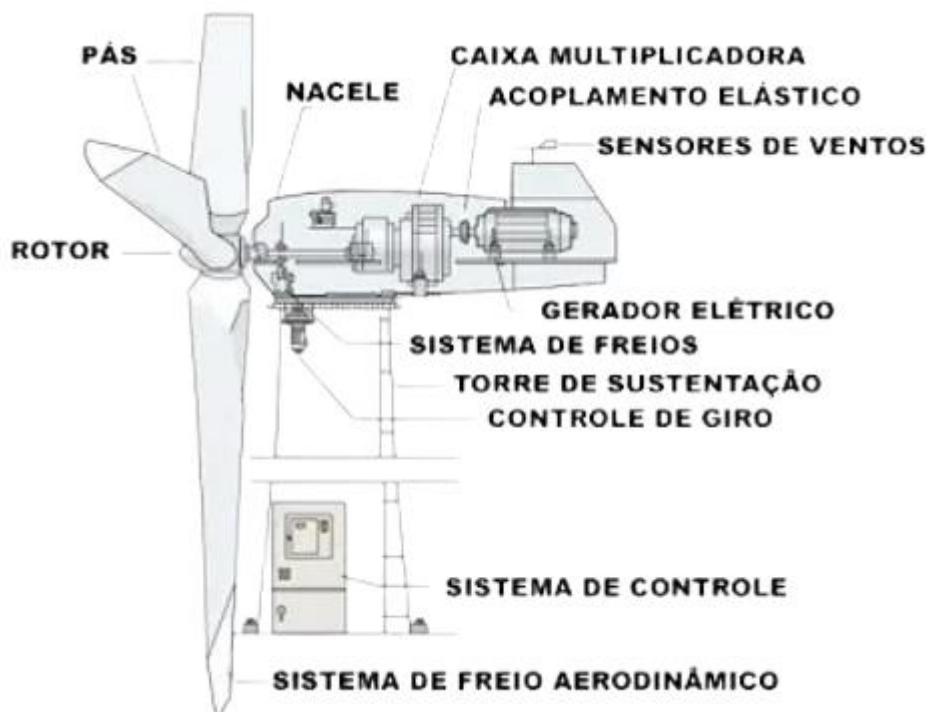


Figura 1 – Partes de um aerogerador eólico.

2.2 - Tipos de Turbinas Eólicas: HAWTs e VAWTs

HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine - Turbina Eólica de Eixo Horizontal)

Descrição: Este é o tipo mais comum e reconhecível de turbina eólica, similar às grandes turbinas encontradas em parques eólicos. Possui pás longas que giram em torno de um eixo horizontal.

Funcionamento: As pás são projetadas para capturar o vento de uma direção específica (geralmente ajustada por um sistema de guinada) e girar um rotor que aciona um gerador.

Características: Alta eficiência em ventos consistentes e de alta velocidade. Necessita de sistemas para orientar as pás na direção do vento.

H-Rotor (Tipo H de Eixo Vertical)

Descrição: É um tipo de Turbina Eólica de Eixo Vertical (VAWT) onde as pás são retas e montadas verticalmente, formando um perfil que se assemelha à letra "H" quando vistas de cima.

Funcionamento: As pás capturam o vento de qualquer direção horizontal, fazendo o rotor girar em torno de um eixo vertical.

Características: Não precisa se orientar na direção do vento, o que é uma vantagem em ambientes urbanos com ventos turbulentos. Pode ter um bom desempenho em ventos variáveis.

Savonius (Tipo Savonius de Eixo Vertical)

Descrição: É outro tipo de VAWT, caracterizado por pás em forma de concha ou "S" (geralmente duas ou três). Parece um barril cortado ao meio e deslocado.

Funcionamento: Funciona principalmente por arrasto: o vento empurra a superfície côncava da pás, enquanto a superfície convexa oferece menos resistência, criando a rotação.

Características: Tem um alto torque de partida (começa a girar com ventos fracos), mas geralmente possui uma eficiência mais baixa do que outros tipos de turbinas. Também não precisa de orientação para o vento. É robusto e mais silencioso.

Darrieus (Tipo Darrieus de Eixo Vertical)

Descrição: É um VAWT com pás que têm um perfil aerodinâmico (como asas de avião) e são curvadas. A forma mais comum é a "egg-beater" (batedor de ovos) ou "troposkien" (curva de corda pendurada invertida).

Funcionamento: As pás geram sustentação aerodinâmica à medida que giram através do vento, similar ao que faz um avião voar.

Características: Possui alta eficiência em ventos fortes, similar às HAWTs, mas também tem a vantagem de ser omnidirecional (não precisa se orientar). No entanto, o design Darrieus tradicional pode ter um baixo torque de partida e exigir um motor externo para iniciar a rotação em ventos fracos.

TYPES OF VERTICAL AXIS WIND TURBINES

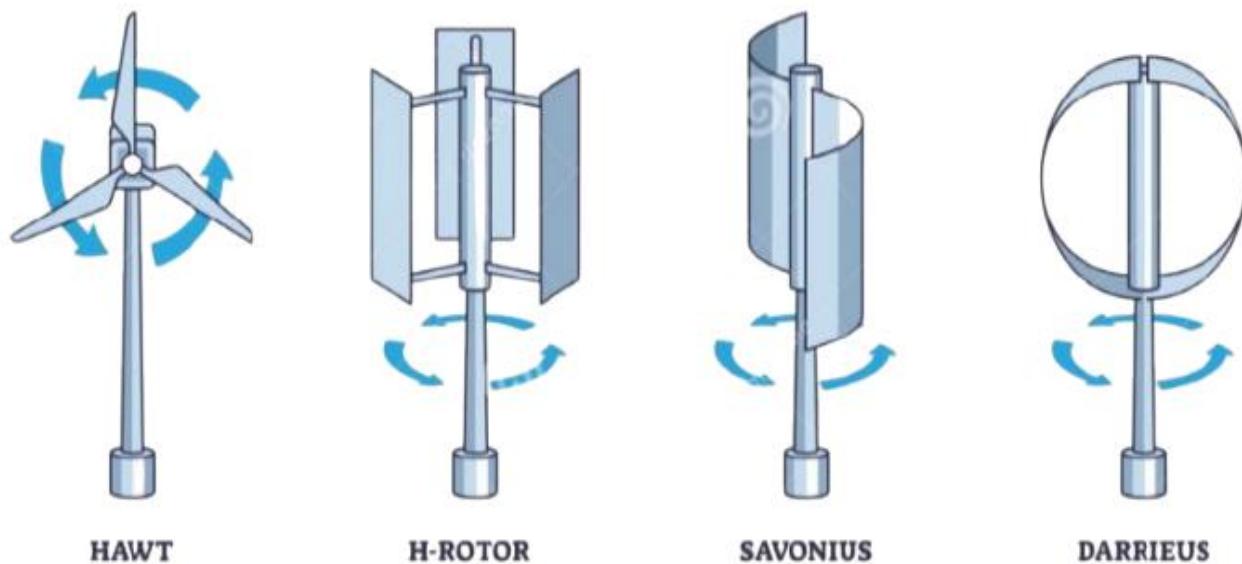


Figura 2 – Tipos Comuns de Turbinas Eólicas: De Eixo Horizontal e Vertical

2.3 - Aplicações Específicas: Edifícios e Plataformas Offshore

A instalação de turbinas eólicas em edifícios e plataformas offshore representa ambientes de operação com características muito distintas e desafios vibracionais únicos:

Edifícios: As turbinas eólicas em edifícios (geralmente de menor porte, para geração distribuída ou demonstração) são instaladas no telhado ou em estruturas elevadas anexas. A principal vantagem é a proximidade com o consumidor final de energia.

No entanto, a turbulência do vento é amplificada pela presença de outros edifícios, e a estrutura do edifício atua como a fundação da turbina, transferindo as cargas dinâmicas e exigindo uma análise detalhada da interação turbina-edifício para evitar vibrações excessivas que afetem o conforto dos ocupantes ou a integridade do edifício.

Plataformas Offshore: As turbinas offshore são tipicamente de grande porte, instaladas em águas costeiras ou mais profundas. Este ambiente oferece ventos mais fortes e constantes, mas expõe as estruturas a carregamentos complexos de vento, ondas e correntes.

A fundação de uma turbina offshore é uma estrutura complexa, submersa e sujeita a ambientes corrosivos, com desafios logísticos e de manutenção significativos. A interação fluido-estrutura torna a análise dinâmica e de fadiga ainda mais crítica.



Figura 3 – Parque Eólico Offshore Flutuante.



Figura 4 – Turbina Eólica Vertical no Telhado de Edifício Urbano

2.4 - Fontes de Vibração

As vibrações em turbinas eólicas podem ser classificadas em duas categorias principais:

Vibrações Operacionais: Inerentes ao funcionamento da turbina

Desbalanceamento do Rotor: Causado por pequenas diferenças de massa ou características aerodinâmicas entre as pás. Gera forças centrífugas desiguais na nacelle e torre.

Interação Aerodinâmica das Pás com a Torre (Torre-Shadow Effect): A passagem das pás pela esteira da torre provoca variações na velocidade do vento e, consequentemente, flutuações de carga aerodinâmica. Este efeito é mais pronunciado em turbinas a barlavento (upwind).

Vibrações do Trem de Força: Componentes como a caixa de engrenagens e o gerador podem gerar vibrações devido a folgas, desalinhamentos ou imperfeições de fabricação, propagando-se para o restante da estrutura.

Frequência de Rotação (1P): Relacionada à velocidade de rotação do rotor.

Frequência de Passagem das Pás (nP): Onde ‘n’ é o número de pás (tipicamente 3P para turbinas de três pás).

Vibrações Ambientais: Causadas por forças externas à turbina.

Ação do Vento: A turbulência do vento e as rajadas são fontes primárias de excitação dinâmica, induzindo cargas cíclicas na torre e nas pás. O fenômeno de desprendimento de vórtices (Von Karman) em estruturas cilíndricas, como a torre, pode gerar forças transversais oscilatórias.

Cargas de Ondas e Correntes Marítimas (Offshore): Em plataformas offshore, ondas e correntes exercem forças cíclicas significativas na estrutura de suporte. A frequência e amplitude dessas forças dependem das características do mar e da geometria da estrutura submersa.

Interação Solo-Estrutura (Onshore e Edifícios): Em instalações em terra ou em edifícios, a interação com o solo ou com a estrutura do edifício pode influenciar a resposta dinâmica. Tremores sísmicos, embora menos frequentes, também representam uma fonte de excitação.

2.5 - Equação Diferencial do Movimento para Sistemas Dinâmicos

O comportamento de um sistema vibratório pode ser descrito matematicamente. Para um sistema simplificado de um Grau de Liberdade (1-GL) com amortecimento viscoso linear, a equação diferencial do movimento é:

$$m \ddot{x}(t) + c \dot{x} + kx(t) = F(t) \quad (1)$$

Onde:

m : massa do sistema [kg];

c : coeficiente de amortecimento viscoso $\left[N \cdot \frac{s}{m}\right]$;

k : rigidez do sistema $\left[\frac{N}{m}\right]$;

$x(t)$: deslocamento [m];

$\dot{x}(t)$: velocidade $\left[\frac{m}{s}\right]$;

$\ddot{x}(t)$: aceleração $\left[\frac{m}{s^2}\right]$;

$F(t)$: força externa aplicada [N].

A partir desta equação, definem-se parâmetros fundamentais:

Frequência Natural Não Amortecida (ω_n): A frequência na qual o sistema vibraria se não houvesse amortecimento ou forças externas.

$$\omega_n = \left(\sqrt{\frac{k}{m}} \right) \quad (2)$$

Razão de Amortecimento (ζ): Uma medida adimensional da dissipação de energia do sistema.

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (3)$$

Frequência Natural Amortecida (ω_d): A frequência real de oscilação do sistema amortecido.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4)$$

2.3 - O Fenômeno da Ressonância e o Fator de Amplificação Dinâmica (DAF)

A ressonância é um fenômeno crítico que ocorre quando a frequência de uma força de excitação externa (f_{exc}) se aproxima ou coincide com uma das frequências naturais (f_n) da estrutura. Isso leva a um aumento drástico na amplitude das vibrações, resultando em tensões e deslocamentos excessivos que podem causar danos severos ou falha estrutural, mesmo sob cargas relativamente baixas.

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:

$$DAF = \frac{1}{\sqrt{\left\{ \left[1 - \left(\frac{f_{exc}}{f_n} \right)^2 \right]^2 + \left(2\zeta \left(\frac{f_{exc}}{f_n} \right) \right)^2 \right\}}} \quad (5)$$

Onde:

f_{exc} : frequência da força de excitação [Hz];

f_n : frequência natural do sistema [Hz];

ζ : razão de amortecimento (adimensional).

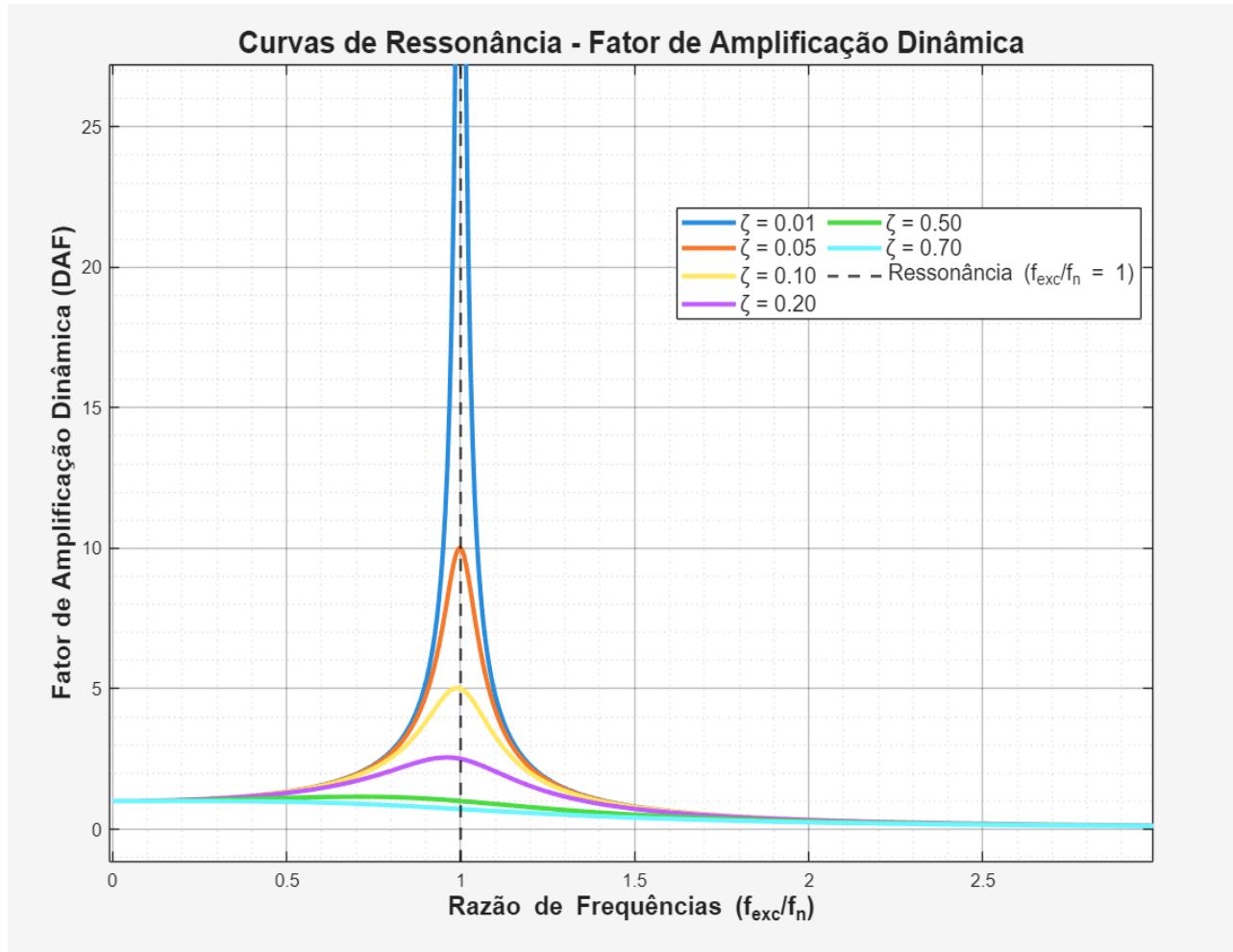


Figura 5 – Resposta Dinâmica de Sistema de Um Grau de Liberdade

Como demonstrado na figura 5, o DAF tende a um pico quando $\frac{f_{exc}}{f_n} \approx 1$, indicando uma amplificação significativa. Projetistas devem garantir que as frequências naturais da turbina e sua estrutura de suporte estejam suficientemente afastadas das frequências de excitação esperadas para evitar a ressonância.

Para turbinas eólicas, isso geralmente significa evitar que a frequência natural da torre coincida com a frequência de passagem das pás (nP) ou com as frequências dominantes das ondas em ambientes offshore (regiões conhecidas como "lock-in zones").

2.69- Tipos de Amortecimento e sua Importância

O amortecimento é o mecanismo pelo qual a energia vibracional é dissipada de um sistema. Sua correta estimativa é vital para prever a amplitude de vibração, especialmente na ressonância.

Amortecimento Viscoso: Proporcional à velocidade. É o modelo mais comum na análise.

Amortecimento Histerético: Devido à deformação inelástica do material.

Amortecimento por Fricção (Coulomb): Devido à fricção entre superfícies em contato.

Amortecimento Estrutural: Dissipação em conexões e juntas.

Amortecimento Aerodinâmico/Hidrodinâmico: Devido à interação com o fluido circundante (ar ou água). Para turbinas eólicas, o amortecimento hidrodinâmico em estruturas offshore pode ser significativo.

A razão de amortecimento (ζ) de estruturas de grande porte pode variar de 0.5% (estruturas soldadas em ar) a 5% (estruturas offshore com efeitos hidrodinâmicos). Subestimar o amortecimento pode levar a uma superestimação das amplitudes de vibração e, consequentemente, a projetos excessivamente conservadores ou a falhas se a amplitude real for muito maior que a prevista.

Conforme ilustrado na Figura 6, o comportamento dinâmico de um sistema varia significativamente com a razão de amortecimento. Para turbinas eólicas, tipicamente observa-se comportamento subamortecido ($0 < \zeta < 1$), onde as vibrações decaem exponencialmente com o tempo, mantendo caráter oscilatório.

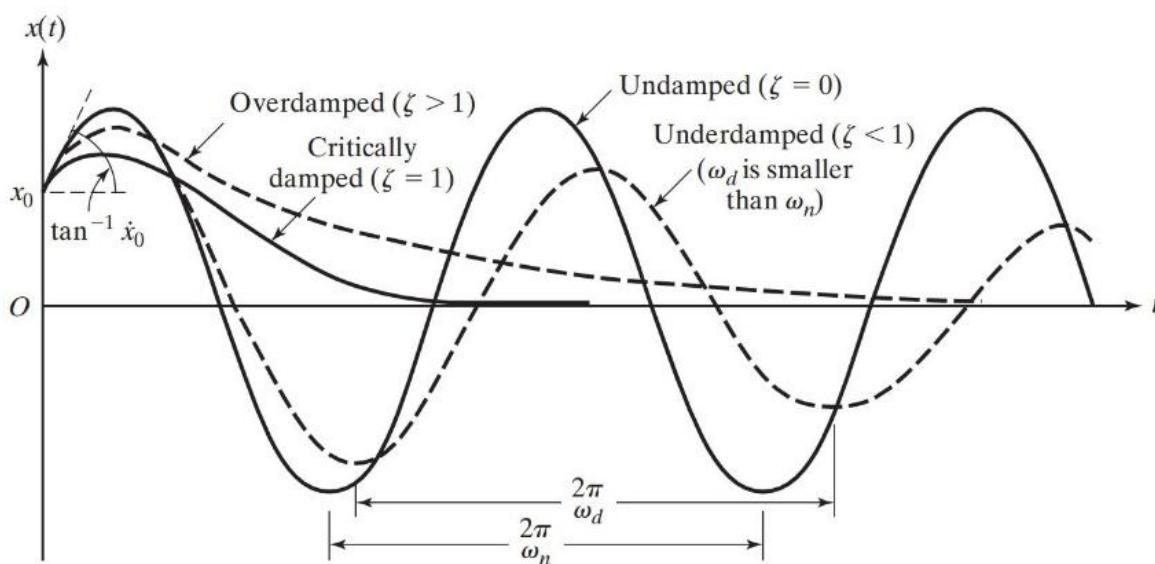


Figura 6 – Comparaçāo do movimento para diferentes tipos de amortecimento (Rao e Yap, 1995).

3 - Análise Dinâmica e Modal de Estruturas de Turbinas Eólicas

Para estruturas complexas como turbinas eólicas, a análise de 1-GL é insuficiente. É necessária uma abordagem de múltiplos Graus de Liberdade (N-GL) e, tipicamente, o uso do Método dos Elementos Finitos (MEF).

3.1 - Equação Diferencial do Movimento para Sistemas N-GL e Análise Modal

Para sistemas com N-GL, a Equação Diferencial do Movimento (EDM) é formulada na forma matricial:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (6)$$

Onde:

$[M]$: Matriz de massa ($N \times N$);

$[C]$: Matriz de amortecimento ($N \times N$);

$[K]$: Matriz de rigidez ($N \times N$);

$x(t)$: Vetor de deslocamentos ($N \times 1$);

$F(t)$: Vetor de forças externas ($N \times 1$).

A Análise Modal é um procedimento fundamental para entender o comportamento dinâmico da estrutura. Ela envolve a solução do problema de autovalores e autovetores para o sistema não amortecido e não excitado:

$$([K] - \omega^2[M])\{\varphi\} = \{0\} \quad (7)$$

$$[M]m\ddot{x}(t) + [C]c\dot{x} + [K]kx(t) = F(t) \quad (8)$$

A solução desta equação fornece:

Autovalores (ω^2): Os quadrados das frequências naturais da estrutura.

Autovetores (φ): Os modos de vibração (formas modais) associados a cada frequência natural. Os modos de vibração representam as configurações de deformação espacial da estrutura quando vibrando em suas frequências naturais.

Conhecer as frequências naturais e os modos de vibração é essencial para:

Verificar se há proximidade com as frequências de excitação (1P, nP, ondas).

Entender as formas de deformação que a estrutura pode assumir.

Servir como base para análises dinâmicas mais complexas (análise de resposta no tempo, análise de resposta em frequência).

3.2 - Aplicação do Método dos Elementos Finitos (MEF)

O MEF é a ferramenta numérica padrão para a análise dinâmica e estrutural de turbinas eólicas, ele permite modelar a geometria complexa da turbina, a interação com a fundação e as cargas ambientais.

Formulação Básica do MEF: Para um elemento finito genérico, a matriz de rigidez elementar é obtida através de:

$$[k]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (9)$$

Onde:

$[k]^e$: Matriz de rigidez do elemento;

$[B]$: Matriz de derivadas das funções de forma;

$[D]$: Matriz constitutiva do material;

V : Volume do elemento.

A matriz de massa consistente do elemento é dada por:

$$[m]^e = \int_V \rho [N]^T [N] dV \quad (10)$$

Onde:

$[m]^e$: Matriz de massa do elemento;

$[N]$: Matriz de funções de forma;

ρ : Densidade do material.

O processo de montagem das matrizes globais envolve a soma das contribuições elementares considerando a conectividade nodal:

$$[K] = A_{\{e=1\}}^{\{N_e\}} [k]^e \quad (11)$$

$$[M] = A_{\{e=1\}}^{\{N_e\}[m]^e} \quad (12)$$

Onde:

$[K]$, $[M]$: Matrizes globais de rigidez e massa;

A : Operador de montagem (assemblage);

N_e : Número total de elementos;

Formulação para Análise Dinâmica: A equação de movimento no MEF para sistemas com amortecimento proporcional (de Rayleigh) é expressa como:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (13)$$

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (14)$$

Onde:

α, β : Coeficientes de amortecimento de Rayleigh;

$\{F(t)\}$: Vetor de forças nodais equivalentes.

3.3 - Etapas da Análise MEF:

3.3.1 - Pré-processamento:

Geometria: Criação ou importação detalhada da geometria da torre, nacelle, rotor, pás e fundação.

Malha: Discretização da geometria em elementos finitos (e.g., elementos de casca para a torre, elementos sólidos para componentes mais robustos, elementos de feixe para as pás). A densidade da malha é crucial em áreas de interesse, como soldas e conexões, para capturar gradientes de tensão.

Propriedades do Material: Atribuição de propriedades elásticas e de densidade para aço (torre), compósitos (pás) e concreto (fundações gravitacionais).

Condições de Contorno: Representação da interface fundação-solo, ancoragens (para flutuantes) ou fixações na estrutura do edifício.

3.3.2 - Processamento (Solver):

Montagem das Matrizes Globais: $[K]$, $[M]$, $[C]$.

Análise Modal: Solução do problema de autovalores generalizado.

Análise Transiente: Integração temporal das equações de movimento.

Análise de Resposta em Frequência: Solução no domínio da frequência.

3.3.3 - Pós-processamento:

Visualização de deslocamentos, velocidades, acelerações e, principalmente, distribuições de tensões.

Extração de históricos de tensão em pontos críticos para a análise de fadiga.

3.4 - Interação Fluido-Estrutura (Offshore) e Vento-Estrutura (Edifícios)

Offshore: A presença da água introduz efeitos hidrodinâmicos significativos:

Massa Adicionada (Added Mass): A água arrastada pela estrutura em movimento aumenta a massa inercial efetiva, reduzindo as frequências naturais.

Amortecimento Hidrodinâmico: A resistência ao movimento na água aumenta a dissipação de energia, ou seja, o amortecimento.

Forças de Drag (Arrasto) e Inércia: As ondas e correntes exercem forças na estrutura que são geralmente modeladas pela Equação de Morison.

Edifícios: O ambiente urbano é caracterizado por complexidade aerodinâmica:

Turbulência do Vento: O fluxo de vento é altamente turbulento devido a edifícios adjacentes, gerando carregamentos de vento imprevisíveis e dinâmicos.

Efeitos de Aerodinâmica de Corpos Geométricos: Fenômenos como *buffeting* (flutuações de pressão induzidas pela esteira de outros edifícios) e *channeling* (aceleração do vento entre edifícios) podem intensificar as cargas na turbina e na estrutura do edifício. A análise aeroelástica pode ser necessária para modelos mais avançados.

4 - Análise de Fadiga e Vida Útil

A fadiga é a principal causa de falha em estruturas sujeitas a carregamentos cíclicos, como turbinas eólicas. Ela é um processo de dano acumulado que pode levar à falha repentina, mesmo com tensões abaixo do limite de escoamento do material.

4.1 - Dano Acumulado (Regra de Palmgren-Miner)

A Regra de Palmgren-Miner é a abordagem mais utilizada para estimar o dano acumulado em um componente sujeito a um espectro de tensões variáveis. Ela assume que o dano causado por cada ciclo de tensão é independente e aditivo. A falha ocorre quando o dano acumulado (D) atinge 1.0.

$$D = \sum_{Ni}^{ni} \leq 1 \quad (15)$$

Onde:

ni : Número de ciclos aplicados na amplitude de tensão S_i ;

Ni : Número de ciclos até falha para a amplitude S_i (obtido de curvas S-N).

4.2 - Curvas S-N (Tensão vs. Número de Ciclos)

As curvas S-N são gráficas que relacionam a amplitude da tensão cíclica (S) com o número de ciclos (N) que um material ou junta soldada pode suportar antes de falhar por fadiga. São obtidas experimentalmente e são específicas para cada material, geometria da junta e ambiente (ex: ar, água do mar). A relação S-N é frequentemente descrita pela Lei de Basquin:

$$S^m \cdot N = C \quad (16)$$

onde m e C são constantes do material, obtidas a partir de ensaios de fadiga. Normas como a DNV-RP-C203 fornecem curvas S-N para diferentes classes de juntas soldadas em ambientes marítimos.

4.3 - Contagem de Ciclos para Cargas de Amplitude Variável (Rainflow Counting)

Para carregamentos reais, que são de amplitude variável (como o vento e as ondas), é necessário um método para converter o histórico de tensões em um conjunto de ciclos de tensão equivalentes, que possam ser usados com as curvas S-N. O método Rainflow Counting (contagem de fluxo de chuva) é o padrão da indústria para essa finalidade, pois é eficaz em identificar ciclos fechados e seus respectivos picos e vales.

4.4 - Efeito da Tensão Média na Vida à Fadiga

A tensão média de um ciclo de tensão afeta significativamente a vida útil à fadiga. Tensões médias de tração geralmente reduzem a vida à fadiga, enquanto tensões médias de compressão podem aumentá-la. Diagramas como os de Goodman, Soderberg ou Gerber são usados para corrigir o limite de fadiga (S_e) para diferentes valores de tensão média (S_m).

$$\frac{S_a}{S_e} + \frac{S_m}{S_{ut}} = \frac{1}{FS} \quad (17)$$

Onde:

S_a : Amplitude de tensão alternada

S_e : Limite de fadiga (tensão média zero)

S_{ut} : Resistência última à tração do material

FS : Fator de segurança

5 - Riscos Associados a Falhas por Vibração e Fadiga

A negligência na análise de vibração e fadiga em turbinas eólicas pode resultar em consequências graves, abrangendo aspectos operacionais, ambientais e financeiros.

5.1 - Riscos Operacionais e de Segurança Humana

Colapso Estrutural: A falha por fadiga de um componente crítico (torre, pá, nacelle) pode levar ao colapso total da turbina, com risco de fatalidades e danos extensos à propriedade, especialmente em plataformas offshore ou áreas urbanas.

Queda de Componentes: Mesmo sem colapso total, a projeção de detritos (pedaços de pá, parafusos) pode ser perigosa para embarcações, pessoal de manutenção ou transeuntes.

Falha em Cascata: Uma pequena trinca de fadiga não detectada pode propagar-se rapidamente, sobrecarregando outros elementos e resultando em falha sistêmica.

5.2 - Riscos Ambientais

Particularmente em instalações offshore, as falhas podem ter impactos ambientais significativos:

Vazamento de Fluidos: Óleos lubrificantes e fluidos hidráulicos da nacelle podem vazar, causando poluição marinha e danos à vida aquática.

Impacto na Vida Marinha: O colapso de grandes estruturas no oceano pode causar danos físicos a ecossistemas marinhos.

5.3 - Riscos Financeiros e de Produção

Perda Total do Ativo: A turbina eólica e sua estrutura de suporte representam um investimento multimilionário que pode ser completamente perdido.

Interrupção da Produção de Energia (Downtime): Uma turbina danificada não gera energia, resultando em perda de receita significativa. O tempo de inatividade para reparos ou substituição é prolongado e custoso.

Custos de Reparo e Substituição: Extremamente elevados, agravados pela logística complexa em locais offshore.

Aumento dos Custos de Seguro e Responsabilidade Civil: Falhas aumentam os prêmios de seguro e podem resultar em ações de responsabilidade civil e danos à reputação da empresa.

5.4 - Estudo de Caso Histórico: O Acidente da Plataforma Alexander L. Kielland

O trágico acidente da plataforma Alexander L. Kielland em 1980, no Mar do Norte, embora não seja uma turbina eólica, serve como um poderoso lembrete da importância crítica da análise de fadiga em estruturas offshore.

A plataforma semi-submersível colapsou devido à propagação de uma trinca de fadiga que se iniciou em uma solda de um pequeno tubo não estrutural. Esta trinca, cresceu sob a ação de cargas cíclicas das ondas, levando à falha catastrófica de um dos suportes e ao emborcamento da plataforma, resultando na morte de 123 pessoas.

Este evento reforçou a necessidade de uma compreensão aprofundada dos mecanismos de fadiga, da qualidade das soldas e da inspeção contínua em todas as estruturas marítimas (Franz, 2016).



Figura 7 – Plataforma Alexander L. Kielland.

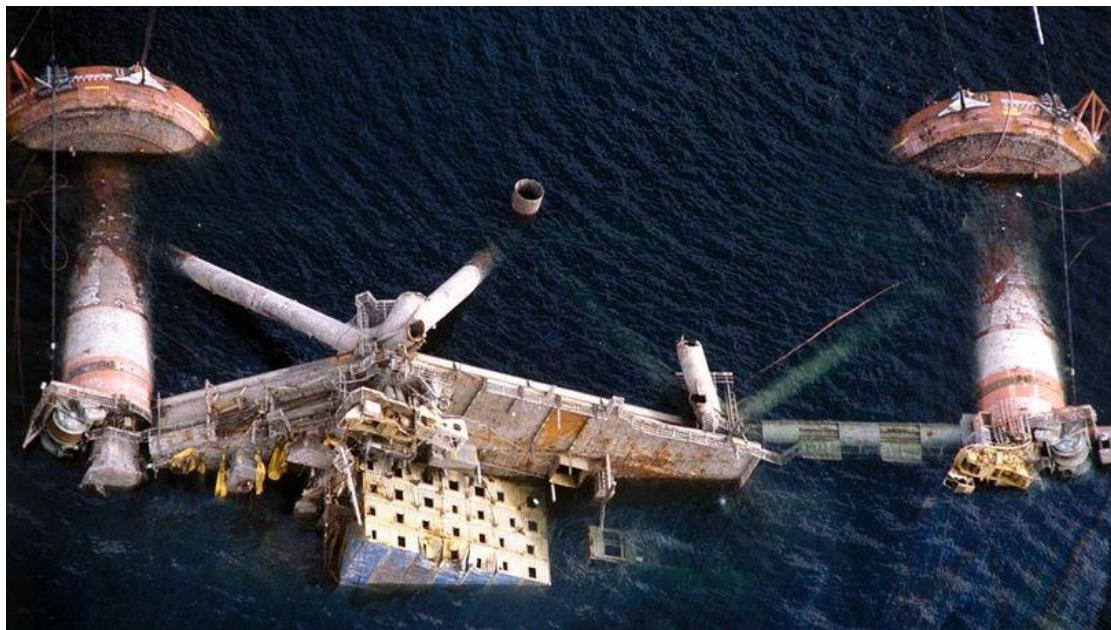


Figura 8 – Acidente da plataforma Alexander L. Kielland.

6 - Sistemas de Monitoramento da Saúde Estrutural (SHM) e Estratégias de Mitigação

Para garantir a segurança e a longevidade das turbinas eólicas, é fundamental implementar estratégias de mitigação e monitoramento contínuo.

6.1 - Projeto Robusto e Otimizado

Evitar Ressonância: O projeto deve garantir que as frequências naturais da turbina estejam suficientemente afastadas das frequências de excitação dominantes. Isso é alcançado pela otimização da rigidez e massa da torre e fundação.

Materiais e Juntas Resistentes à Fadiga: Seleção de materiais com alta resistência à fadiga e uso de detalhes de juntas soldadas otimizados para minimizar a concentração de tensões.

Estratégias de Design: Adoção de conceitos de design "soft-soft", "soft-stiff" ou "stiff-stiff" para a torre, visando posicionar as frequências naturais fora da faixa de operação crítica do rotor (entre 1P e nP) e das ondas.

6.2 - Sistemas de Monitoramento da Saúde Estrutural (SHM)

O SHM é uma abordagem avançada que utiliza uma rede de sensores para coletar dados em tempo real sobre o comportamento estrutural, permitindo a detecção precoce de anomalias e a manutenção preditiva.

6.2.1 - Tipos de Sensores e Aplicação:

Acelerômetros: Medem a aceleração e vibração da estrutura. Essenciais para monitorar frequências de vibração, amplitudes, identificar frequências naturais e detectar mudanças no comportamento dinâmico que podem indicar danos. Podem ser triaxiais e instalados na nacelle, topo e base da torre.

Medidores de Deformação (Strain Gauges): Medem a deformação (tensão e compressão) em componentes críticos, como juntas soldadas, flanges e seções da torre. Os dados de deformação são diretamente utilizados para calcular o dano por fadiga acumulado, fornecendo uma base real para a estimativa da vida útil remanescente.

Sensores de Fibra Óptica: Oferecem alta sensibilidade, são imunes a interferências eletromagnéticas e podem ser embutidos em materiais compósitos (pás) ou instalados para monitoramento distribuído de deformação e temperatura.

Sensores de Emissão Acústica: Detectam ondas sonoras de alta frequência geradas pelo crescimento de microfissuras e trincas. Permitem a detecção precoce de danos de fadiga antes que sejam visíveis.

Inclinômetros: Monitoram mudanças na inclinação da estrutura, indicando possíveis recalques de fundação ou deformações globais excessivas.

Sensores de Vento e Onda: Medem as condições ambientais para correlacionar com a resposta estrutural.

Otimização do SHM: O posicionamento dos sensores deve ser otimizado para capturar os modos de vibração mais relevantes e as tensões nos pontos críticos. Algoritmos avançados de processamento de dados, como a Análise Modal Operacional (OMA) e técnicas de inteligência artificial, são empregados para identificar mudanças nas características dinâmicas (frequências naturais, formas modais, amortecimento) que sinalizam o início de danos.

6.3 - Manutenção Preditiva e Inspeções Periódicas

A combinação do SHM com inspeções visuais e Ensaios Não Destrutivos (END), como ultrassom e partículas magnéticas, permite identificar e reparar danos antes que se tornem críticos. A manutenção preditiva, baseada nos dados de monitoramento, otimiza os cronogramas de intervenção, reduzindo custos e minimizando o tempo de inatividade.

7 - Normas e Regulamentações Aplicáveis

O projeto, fabricação, instalação e operação de turbinas eólicas são guiados por normas técnicas rigorosas:

Normas Brasileiras (ABNT):

ABNT NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações: Fundamental para o cálculo das cargas de vento.

ABNT NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios: Essencial para o dimensionamento dos componentes estruturais.

ABNT NBR IEC 61400 (Série): Adaptada das normas internacionais, específica para turbinas eólicas, cobrindo requisitos de projeto, teste de desempenho e segurança.

Normas Internacionais:

DNV-RP-C203: Fatigue Design of Offshore Steel Structures: Publicada pela Det Norske Veritas, é uma das normas mais importantes para análise de fadiga em estruturas de aço offshore, fornecendo diretrizes detalhadas para cálculo de tensões, espectros de carga e curvas S-N.

IEC 61400 (Série): Wind turbines: Amplamente utilizada globalmente, estabelece requisitos de projeto para turbinas eólicas, incluindo aspectos de cargas, segurança e desempenho.

ISO 19902: Petroleum and natural gas industries — Fixed steel offshore structures: Relevante para o projeto de fundações e estruturas de suporte offshore.

ISO 2631: Mechanical vibration and shock — Evaluation of human exposure to whole-body vibration: Para instalações em edifícios, avalia o conforto humano em relação às vibrações.

8 - Estudo de Caso Simplificado: Turbina Offshore (NREL 5-MW)

Para ilustrar os conceitos de vibração e fadiga, considere um estudo de caso simplificado de uma turbina eólica offshore, utilizando a turbina de referência Siemens Gamesa SG 14-222 DD e dados realistas para um ambiente costeiro.

8.1 - Parâmetros de Projeto da Turbina 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



Figura 9 – Turbina Eólica Siemens Gamesa SG 14-222 DD

8.2 - Propriedades Estruturais da Torre (Exemplo):

Primeira Frequência Natural de Flexão (f_n): 0,18 Hz (projetada para evitar ressonância)

Razão de Amortecimento (ζ): 0,015 (1,5%) em ar, podendo atingir 0,03–0,05 em ambiente offshore devido aos efeitos hidrodinâmicos

8.3 - Condições de Excitação (Exemplo):

Frequência de Rotação do Rotor (1P): 0,083–0,202 Hz (faixa operacional completa)

Frequência de Passagem das Pás (3P): 0,25–0,605 Hz (para turbina de 3 pás)

Frequência de Excitação das Ondas (f_{exc}): 0,04–0,20 Hz (períodos de 5 a 25 segundos)

Frequência de Desprendimento de Vórtices: 0,15–0,35 Hz (dependente da velocidade do vento)

8.4 - Análise de Ressonância (DAF)

Utilizando a Equação (5) do Fator de Amplificação Dinâmica, e considerando os parâmetros da turbina SG 14-222 DD:

Para $f_n = 0,18$ Hz e $\zeta = 0,015$, observa-se que as frequências de excitação ambiental e operacional se encontram estrategicamente posicionadas em relação à frequência natural:

Faixa 1P (0,083–0,202 Hz): Margem de segurança de aproximadamente 10% em relação a f_n

Faixa 3P (0,25–0,605 Hz): Afastamento significativo, minimizando risco de ressonância

Ondas (0,04–0,20 Hz): Sobreposição parcial, porém com amortecimento hidrodinâmico aumentado.

O DAF máximo teórico para esta configuração seria:

$$DAF_{\max} = \frac{1}{2\zeta} = \frac{1}{2 \times 0,015} \approx 33,3$$

Entretanto, na prática, o projeto assegura que o sistema opere com $DAF < 5$ na maior parte do espectro operacional, através do adequado posicionamento das frequências naturais e aproveitamento do amortecimento hidrodinâmico.

A Figura 10 apresenta a variação do Fator de Amplificação Dinâmica (DAF) em função da razão entre a frequência de excitação e a frequência natural da estrutura. Observa-se que o pico de amplificação ocorre na condição de ressonância ($\frac{f_{exc}}{f_n} = 1$), onde o DAF atinge valores teóricos da ordem de 33,3 para amortecimento estrutural típico em ar ($\zeta = 0,015$). A presença de amortecimento hidrodinâmico em ambiente offshore ($\zeta = 0,040$) reduz significativamente a amplitude de vibração, diminuindo o DAF máximo para aproximadamente 12,5. As faixas de operação 1P e 3P encontram-se estrategicamente posicionadas fora da região de alta amplificação, demonstrando o adequado dimensionamento dinâmico da turbina.

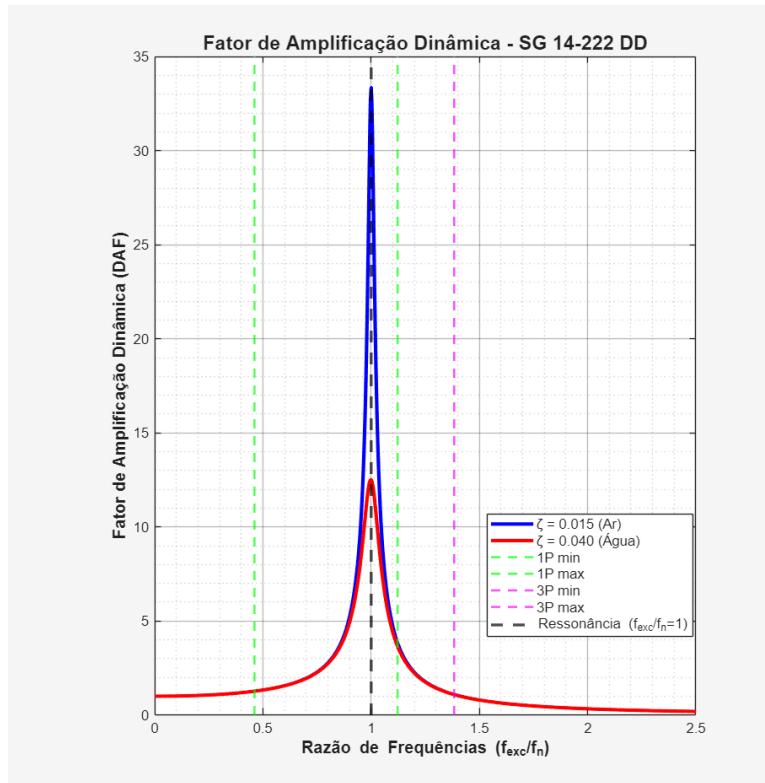


Figura 10 - Fator de Amplificação Dinâmica em função da razão de frequências para diferentes valores de amortecimento.

A Figura 11 mostra o mesmo comportamento do DAF em função da frequência absoluta de excitação, destacando as faixas operacionais da turbina SG 14-222 DD em relação à sua frequência natural ($f_n = 0,18$ Hz). Nota-se que a frequência natural se situa entre as faixas 1P (0,083–0,202 Hz) e 3P (0,25–0,605 Hz), caracterizando uma estratégia de projeto 'soft-stiff' que minimiza o risco de ressonância durante a operação normal. A faixa de excitação das ondas (0,04–0,20 Hz) apresenta sobreposição parcial, porém o aumento do amortecimento hidrodinâmico mitiga os efeitos de amplificação nesta região.

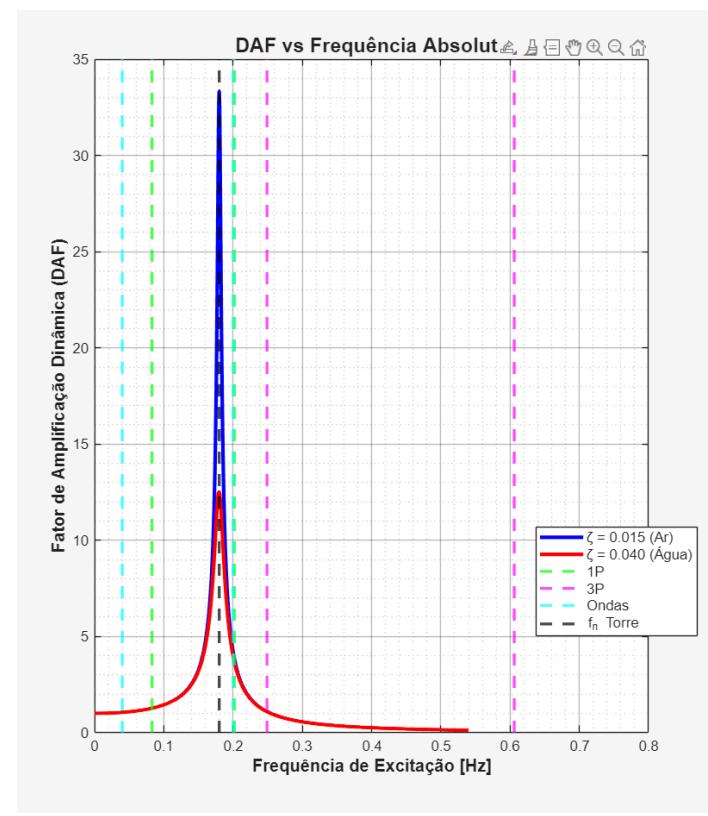


Figura 11 - Comportamento do DAF em função da frequência absoluta, com destaque para as faixas de excitação operacional e ambiental.

8.5 - Análise de Fadiga Simplificada

Considerando um ponto crítico na base da torre em aço estrutural S355 e aplicando a metodologia de fadiga:

Espectro de Tensões Anual (obtido via Rainflow Counting):

$$S_1 = 150 \text{ MPa}, n_1 = 1 \times 10^5 \text{ ciclos/ano}$$

$$S_2 = 100 \text{ MPa}, n_2 = 5 \times 10^6 \text{ ciclos/ano}$$

$$S_3 = 60 \text{ MPa}, n_3 = 2 \times 10^7 \text{ ciclos/ano}$$

Parâmetros do Material (Curva S-N Classe C, DNV-RP-C203):

$$m = 3,0$$

$$C = 1,51 \times 10^{12}$$

Cálculo dos Ciclos até falha (N_i):

$$N_1 = \left(\frac{C}{S^{1m}} \right) = \left(\frac{(1,51 \times 10^{12})}{(150)^3} \right) \approx 4,47 \times 10^5 \text{ ciclos}$$

$$N^2 = \frac{C}{S^{2m}} = \left(\frac{1,51 \times 10^{12}}{(100)^3} \right) = 1,51 \times 10^6 \text{ ciclos}$$

$$N^3 = \frac{C}{S^{3m}} = \left(\frac{(1,51 \times 10^{12})}{(60)^3} \right) \approx 6,99 \times 10^6 \text{ ciclos}$$

Cálculo do Dano Acumulado Anual (D):

$$D = \frac{n^1}{N^1} + \frac{n^2}{N^2} + \frac{n^3}{N^3}$$

$$D = \frac{1 \times 10^5}{4,47 \times 10^5} + \frac{5 \times 10^6}{1,51 \times 10^6} + \frac{2 \times 10^7}{6,99 \times 10^6}$$

$$D = 0,224 + 3,311 + 2,861 = 6,396$$

Análise do Resultado: O dano anual $D = 6,396$ indica que, neste cenário simplificado, a vida útil seria inferior a um ano. Entretanto, é importante destacar que:

Este é um exemplo acadêmico com espectro de tensões conservador.

Projetos reais incorporam fatores de segurança, detalhamento otimizado de juntas e espectros de carga realistas.

A vida útil típica projetada para turbinas offshore é de 20–25 anos, correspondendo a $D \approx 0,04$ – $0,05$ por ano

A Figura 12 ilustra a curva S-N para o aço estrutural S355 (Classe C according to DNV-RP-C203), utilizada na análise de fadiga da torre. Os pontos marcados S1, S2 e S3 representam o espectro de tensões considerado no exemplo simplificado, mostrando a relação inversa entre amplitude de tensão e número de ciclos até falha. A inclinação da curva ($m = 3,0$) é característica de juntas soldadas em aço estrutural, onde pequenos aumentos na amplitude de tensão resultam em reduções significativas na vida à fadiga.

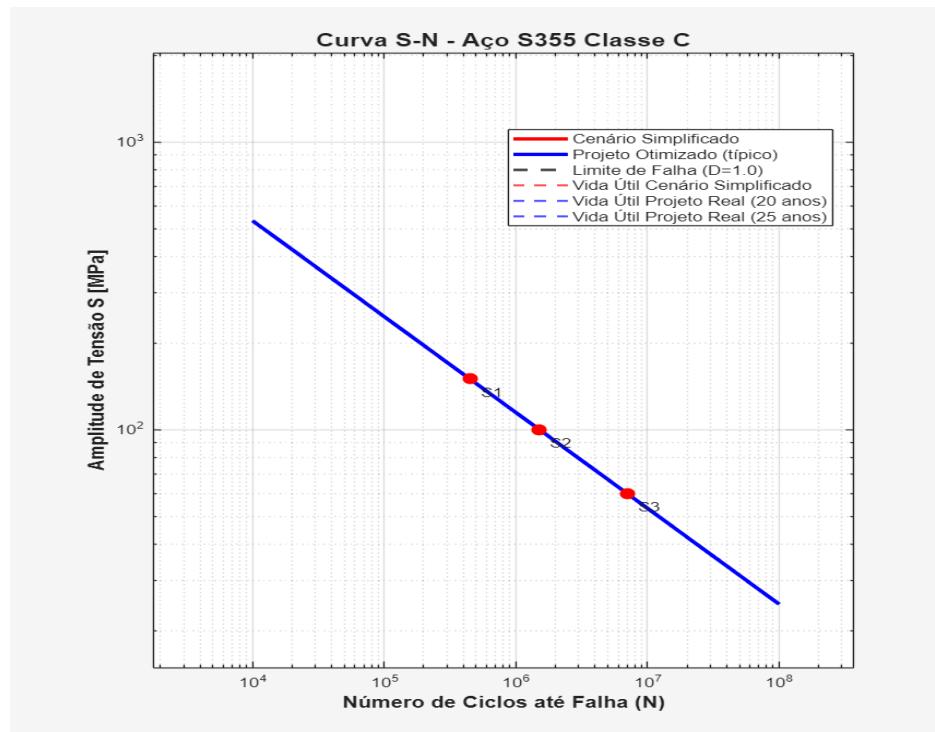


Figura 12 - Curva S-N para aço S355 Classe C (DNV-RP-C203) com pontos do espectro de tensões analisado.

A Figura 13 apresenta a progressão do dano acumulado ao longo do tempo, comparando o cenário simplificado do exemplo com um projeto realista otimizado. No cenário simplificado, o dano anual $D = 6,396$ levaria à falha em menos de um ano, destacando a importância de espectros de carga realistas e detalhamento adequado de juntas. Em contraste, projetos otimizados atingem o limite de falha ($D = 1,0$) apenas após 20–25 anos de operação, correspondendo a um dano anual típico de $D = 0,04$ – $0,05$. Esta diferença evidencia a efetividade das estratégias de projeto robusto na garantia da vida útil desejada.

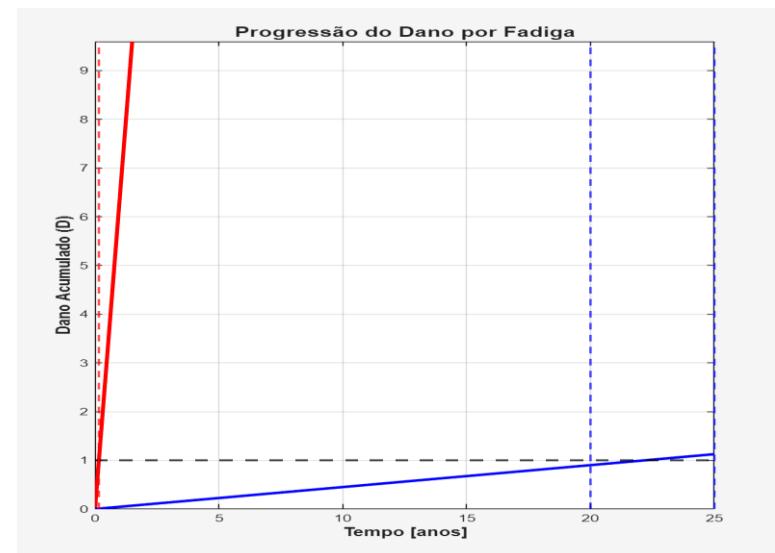


Figura 13 - Progressão do dano acumulado por fadiga: comparação entre cenário simplificado e projeto otimizado.

A Figura 14 demonstra a sensibilidade do Fator de Amplificação Dinâmica a variações na razão de amortecimento. Nota-se que mesmo pequenos incrementos no amortecimento resultam em reduções significativas do DAF na região de ressonância. Para $\zeta = 0,005$ (estruturas com baixa dissipação), o DAF atinge valores superiores a 100, enquanto para $\zeta = 0,05$ (típico de estruturas offshore com significativos efeitos hidrodinâmicos), o DAF máximo é limitado a aproximadamente 10. Esta análise reforça a importância da correta estimativa dos níveis de amortecimento em projetos de turbinas eólicas offshore.

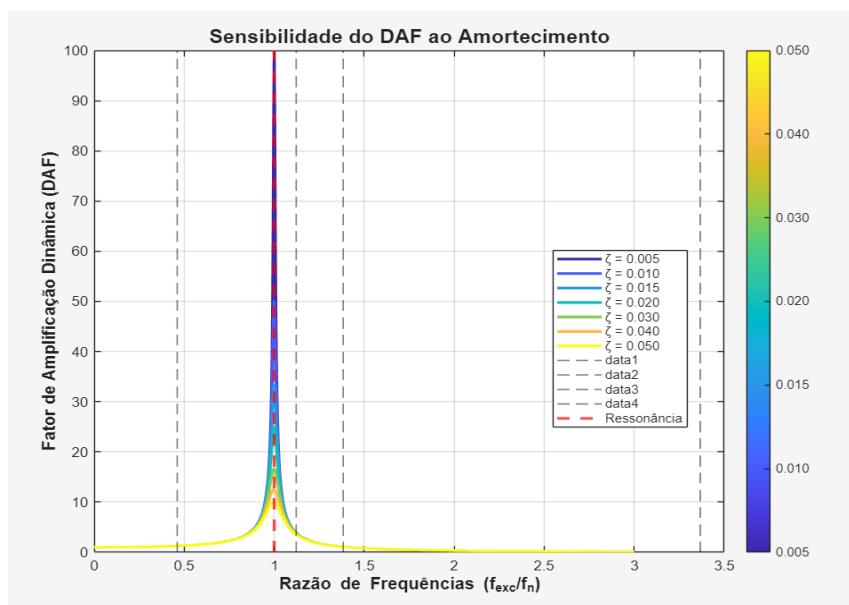


Figura 14 - Sensibilidade do Fator de Amplificação Dinâmica à variação da razão de amortecimento.

A análise dinâmica e de fadiga apresentada demonstra a interdependência entre os aspectos vibratórios e a durabilidade estrutural. O adequado posicionamento das frequências naturais, conjugado com a consideração realista dos níveis de amortecimento e espectros de carga, é fundamental para garantir tanto o desempenho operacional quanto a vida útil projetada de 25 anos para turbinas offshore de última geração como a SG 14-222 DD.

9 - Conclusões

A análise dos efeitos de vibrações em turbinas eólicas em instalações offshore e em edifícios revela a complexidade e a criticidade desses fenômenos para a segurança e a longevidade dessas estruturas. Este artigo demonstrou que a vibração e a fadiga não são meros detalhes de projeto, mas fatores determinantes que governam o design, a operação e a viabilidade econômica.

A fundamentação teórica das vibrações, incluindo as Equações Diferenciais do Movimento, o fenômeno da ressonância e a importância do amortecimento, forma a base para uma análise precisa.

A aplicação da Análise Modal e do Método dos Elementos Finitos (MEF) é indispensável para modelar o comportamento dinâmico complexo e a interação com o ambiente (fluído-estrutura ou vento-estrutura).

A análise de fadiga, utilizando a Regra de Palmgren-Miner, curvas S-N, Rainflow Counting e considerando o efeito da tensão média, é crucial para prever a vida útil sob carregamentos cíclicos.

Os riscos associados a falhas por vibração e fadiga são multifacetados, abrangendo desde o colapso estrutural e a perda de vidas até impactos ambientais e perdas financeiras substanciais, como evidenciado pelo acidente da plataforma Alexander L. Kielland.

A implementação de sistemas de Monitoramento da Saúde Estrutural (SHM), com o uso estratégico de acelerômetros, medidores de deformação, sensores de fibra óptica e outros, emerge como uma estratégia proativa vital para a detecção precoce de danos e a gestão contínua da integridade estrutural.

Em suma, a compreensão aprofundada dos efeitos de vibração e fadiga, aliada à aplicação rigorosa de normas técnicas e à adoção de tecnologias de modelagem e monitoramento avançadas, é fundamental para garantir a segurança, a durabilidade e a sustentabilidade da crescente indústria de energia eólica.

Uma abordagem abrangente e dinâmica no projeto e na manutenção não é apenas uma boa prática de engenharia, mas uma necessidade imperativa para o sucesso a longo prazo desta importante fonte de energia renovável.

10 - Referências Bibliográficas

- ABNT. NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro, 1988.
- ABNT. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- Chopra, A. K. (2014). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Pearson Education.
- DNV. (2020). *DNV-RP-C203: Fatigue Design of Offshore Steel Structures*. Det Norske Veritas.
- Gholamreza Amirinia, Sungmoon Jung. Buffeting response analysis of offshore wind turbines subjected to hurricanes.
- Franz, A. S. (2016). *Verificação à fadiga por análise estática e dinâmica de uma estrutura offshore*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- IEC. IEC 61400 (Série): Wind turbines. International Electrotechnical Commission.
- JONKMAN, J. et al. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- Lima, J. B. C. A. (2011). *Contribuições para otimização estrutural de torres tubulares de aço para turbinas eólicas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Simões, R. G. (2020). *Análise estrutural dinâmica e verificação de projeto à fadiga de torres de aço para suporte de turbinas eólicas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Thomson, W. T., & Dahleh, J. (1998). *Theory of Vibration with Applications*. Prentice Hall.
- Wirsching, P. H., Ortiz, K., & Chen, Y. N. (1995). *Random Vibrations: Theory and Practice*. Dover Publications.