



CONTROLE DINÂMICO DE VIBRAÇÕES DE UMA TURBINA EÓLICA MARINHA SUJEITA A AÇÃO DE ONDAS E VENTO

Rodolfo Santos Conceição

rodolfo.aju@hotmail.com

Instituto Federal de Sergipe – IFS

Av. Eng. Gentil Tavares, 1166, Getúlio Vargas, 49055260, Aracaju, Sergipe, Brasil

Marcela Lima Santos

marcela.lsantos@coc.ufrj.br

Instituto Multidisciplinar – UFRRJ / Programa de Engenharia Civil – COPPE/UFRJ

Av. Governador Roberto Silveira S/N, Centro, 26020740, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro, Brasil
/ Av. Horácio Macedo 2030, Cidade Universitária, 21941-972, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo. *A utilização de turbinas eólicas como ferramenta alternativa de geração de energia elétrica, é recorrente em todo o mundo. As condições de escoamento suaves e maiores velocidades de vento tornam as regiões marítimas favoráveis a implementação desta alternativa energética. A ação do mar em estruturas promove solicitações dinâmicas, como o carregamento dinâmico possui período ínfimo em relação à vida de projeto da estrutura, ele se repetirá milhões de vezes. Desta forma, torna-se interessante a instalação de um dispositivo de atenuação das vibrações, objetivando ampliar a vida útil da estrutura. Nessa perspectiva, o presente trabalho visa analisar o comportamento dinâmico de uma estrutura para turbina eólica, sujeita a ação de ondas e vento, à qual se deseja acoplar um atenuador de vibrações, bem como determinar as características deste atenuador. A estrutura analisada corresponde a um exemplo típico de estrutura adotada em regiões marítimas, cuja torre é tubular metálica formada por seção circular de alma vazada, sobre a qual se deseja instalar uma turbina eólica. Uma análise comparativa foi desenvolvida no aspecto estático e dinâmico, a fim de avaliar a contribuição do atenuador. Comparando-se as duas análises com relação ao deslocamento no topo da torre, verificou-se um fator de amplificação dinâmica expressivo.*

Palavras-chave: *Dinâmica, Ação do vento, Ação de ondas, Controle e Redução de Vibrações*

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é uma fonte limpa de energia, uma vez que não emite gases poluentes e nem gera resíduos, além de ser inesgotável, justificando sua grande importância no cenário mundial atual. No Brasil, o interesse pela exploração de energia eólica para produção de eletricidade é recente. A partir de 1974, com a crise do petróleo, algumas universidades e instituições de pesquisa iniciaram alguns trabalhos isolados de desenvolvimento de aerogeradores em certas regiões do país. Os resultados de várias dessas pesquisas indicaram alguns estados da região nordeste, como o Ceará, Rio Grande do Norte e Pernambuco (Fernando de Noronha) favoráveis para esse tipo de exploração (Rivera, 2013).

As condições de escoamento suaves e maiores velocidades de vento tornam as regiões litorâneas favoráveis à implementação desta alternativa energética. Uma alternativa de instalação de turbinas eólicas adotada mundialmente, principalmente na Europa, trata-se da alocação destas em áreas marítimas, usufruindo das vantagens anteriores e mitigando a poluição acústica e visual na região.

O potencial eólico no Brasil segundo o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica é de 143,5GW, sendo a região nordeste com 75GW a mais importante (Amarante *et al.*, 2001). De 2009 a 2014, nos onze leilões dos quais a fonte eólica participou, foram contratados mais de 12GW em novos projetos. Tais projetos elevarão o volume de instalações de energia eólica no país para mais de 14,3GW até 2018, quantidade três vezes maior do que a capacidade atual, e atrairá mais de quarenta bilhões de reais em investimentos (Melo, 2014).

A complexidade envolvida na modelagem das estruturas eólicas constitui um desafio para os profissionais da área, o projeto envolve áreas multidisciplinares dentre as quais se destacam: engenharias mecânica e estrutural, sistemas mecânicos dinâmicos de controle, aerodinâmica e aeroelasticidade, engenharia elétrica, meteorologia. Por outro lado, a modelagem das características dinâmicas da ação do vento, tais como turbulência, gradientes de velocidades, frequências de ocorrência dependem das condições locais e requerem um estudo detalhado (Battista, 2009).

As tormentas são os sistemas meteorológicos que originam ventos de alta velocidade (ventos fortes), independentemente de seu mecanismo de formação. Em ciclones extratropicais, com ventos de alta velocidade, a rugosidade da superfície terrestre causa uma turbulência tão intensa que a mistura entre camadas adjacentes de ar impede processos de convecção. As flutuações são quase que exclusivamente causadas por agitação mecânica do ar, com a formação de um grande número de turbilhões ou redemoinhos (Blessmann, 1995).

A ação do vento sobre a superfície marítima transfere, por atrito, a energia do vento para o mar, formando as ondas. Cabe ressaltar, entretanto, que as ondas podem ser geradas por outros fenômenos como deslizamentos de terra, explosões e terremotos, sendo estes casos relativamente incomuns. Responsáveis por promover um constante balanço na estrutura, as ondas geram uma preocupação natural no comportamento estrutural para elementos *offshore*. Dessa forma, as forças exercidas pelas ondas requerem um estudo particularizado, sendo muita das vezes determinantes nos critérios de dimensionamento estrutural.

Forças externas promovidas por fenômenos ambientais tais como sismo, vento ou ondas, estão associadas à variável tempo, podendo induzir solicitações dinâmicas nas estruturas, que cada vez mais têm se mostrado um fator preocupante para os projetistas. As solicitações provenientes da ação do vento e de ondas, se não forem previstas corretamente, podem promover diferentes tipos de consequências para a estrutura. A ruptura por solicitação estática ao atingir a carga de falha e o colapso pela solicitação dinâmica são exemplos típicos que

podem ser citados. Para estruturas metálicas, um fator preocupante adicional decorrente da solicitação dinâmica é a fadiga, responsável por reduzir a vida útil da estrutura.

Partindo do princípio que a instalação de dispositivos atenuadores de vibrações pode prolongar a vida útil da torre suporte de aerogeradores, o presente trabalho aborda a verificação da possibilidade de instalação de um atenuador passivo pendular não linear, bem como a redução dos deslocamentos e tensões na torre gerada por ele. No entanto, consideraram-se de maneira dinâmica apenas as forças devido ao vento e forças marítimas atuantes diretamente na torre, as forças de arrasto geradas nas pás do aerogerador foram consideradas de maneira estática.

2 FORÇAS DA NATUREZA

2.1 Ação do vento

Os ciclones extratropicais ou tormentas EPS são os fenômenos mais comuns que originam ventos fortes em regiões temperadas e apresentam características de comportamento bem conhecidas. Eles ocorrem devido ao efeito mecânico de cadeias de montanhas sobre correntes atmosféricas de grandes dimensões ou pela interação de massas de ar ao longo das frentes frias (Blessmann, 1995). Estes ventos têm como principal característica pequenas variações na intensidade e direção da velocidade média por várias horas, ou até dias, por isso são também chamados de bem comportados.

Para ventos oriundos de tormentas EPS, a componente da velocidade na direção média do escoamento (direção longitudinal, x), pode ser decomposta em duas parcelas: uma de valor médio, \bar{U} , aproximadamente constante ao longo do tempo e variável apenas com a altura, e outra flutuante em torno da média, u . Dessa forma, dado ponto situado em uma altura z a velocidade de vento pode ser expressa como:

$$U(x, y, z, t) = \bar{U}(z) + u(x, y, z, t), \quad (1)$$

A velocidade média varia ao longo da altura acima do solo em função do perfil de rugosidade do terreno, o qual pode ser representado por meio da lei logarítmica ou da lei potencial (Simiu e Scanlan, 1996). A lei potencial, utilizada na NBR6123 (ABNT, 1988), relaciona a velocidade média em duas alturas, dentro da camada limite atmosférica, e é representada pela seguinte expressão:

$$\frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}(z_g)} = \left(\frac{z}{z_g} \right)^p, \quad (2)$$

onde z é a altura a qual se deseja conhecer a velocidade média, z_g é uma altura de referência com velocidade conhecida e p é um coeficiente que depende das características de rugosidade do terreno.

Para o estudo das componentes flutuantes da velocidade do vento são necessários alguns conceitos básicos para melhor entendimento, como os parâmetros estatísticos e as propriedades de turbulência.

A função densidade espectral S (ou simplesmente espectro) das componentes flutuantes de velocidade de vento descreve o conteúdo em frequência do processo. Dessa forma, a área sob o espectro corresponde à variância (Blessmann, 1995). A variância representa uma medida de dispersão em torno da média e sua raiz quadrada representa o desvio padrão σ . Por

sua vez, a intensidade de turbulência é definida como a relação entre o desvio padrão da componente flutuante e a velocidade média.

Dentre os espectros de flutuação da componente longitudinal S_u mais utilizados se destacam o espectro de Harris, adotado na NBR6123 (ABNT, 1988), o espectro de Davenport, o espectro de Kaimal e o espectro ESDU (2001) o qual é adotado pelo Eurocódigo1 (2005). O presente trabalho fará uso do espectro de Harris, dado pela seguinte equação:

$$\frac{fS_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{0,6 X_1}{(2 + X_1^2)^{5/6}}, \quad (3)$$

onde X_1 é a frequência adimensional, dada pela equação (4), em que L_1 é uma dimensão característica tomada igual a 1800m em função de ajustes e dados experimentais. E a variância σ_u^2 é dada pela equação (5)

$$X_1 = \frac{fL_1}{\bar{U}(z)}, \quad (4)$$

$$\sigma_u^2 = \frac{20}{3} C_{as} U_{10}^2, \quad (5)$$

onde C_{as} é o coeficiente de arrasto superficial e U_{10} é a velocidade média a uma altura de 10m tomado para o tempo de 10 minutos.

A resposta devida à ação do vento em estruturas de comportamento fracamente não linear pode ser obtida considerando a superposição da resposta estática não linear, devido à força média de vento, à máxima resposta dinâmica para a força flutuante.

A determinação da resposta do comportamento da estrutura pode ser obtida no domínio do tempo ou no domínio da frequência. O presente trabalho focaliza o cálculo da resposta no domínio do tempo, que requer a geração de históricos de vento correlacionados espacialmente. A duração de tais históricos precisa ser suficientemente longa para que a variância da resposta calculada seja permanentemente constante, para a qual a máxima resposta esperada pode ser obtida multiplicando o desvio padrão da resposta pelo fator de pico (Eqs. 6 e 7) (Davenport, 1961). Em geral utiliza-se um intervalo de tempo igual a 10 minutos.

$$x_{m\acute{a}x} = \bar{x} + g\sigma_x, \quad (6)$$

$$g = \sqrt{2 \ln(f_j T)} + \frac{0,577}{\sqrt{2 \ln(f_j T)}}, \quad (7)$$

onde \bar{x} é o deslocamento devido a força média, g é o fator de pico, f_j é a frequência do modo de vibração da resposta e T é o intervalo de tempo da estimativa.

Um método para gerar histórias simples de vento não correlacionadas que apresentam características semelhantes é o da auto-regressão (Buchholdt *et al.*, 1985). A correlação entre os históricos pode ser feito através do método proposto por Buchholdt (1998), o qual se baseia numa análise de autovalores da matriz de correlação cruzada.

No Brasil a norma para determinação das forças devidas à ação do vento é a NBR6123 – Forças devidas ao vento em edificações (ABNT, 1988). As forças de arrasto devidas à ação do vento são calculadas, de modo geral pela expressão:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho C_a A_{ef} U_{rel}^2, \quad (8)$$

onde ρ é a massa específica do vento; C_a é o coeficiente de arrasto da estrutura, ou parte da estrutura, na direção em que está sendo considerada a ação do vento; A_{ef} é a área de referência (área da projeção), sobre a qual é calculada a força exercida pelo vento; U_{rel} é a velocidade de vento em relação à estrutura.

Para a análise de estruturas de comportamento dinâmico sob a ação do vento, a força de arrasto é decomposta nas duas parcelas, média e flutuante; assim a Equação (8) aplicada apenas à direção longitudinal é reescrita na forma:

$$F_w = \frac{1}{2} \rho C_a A_{ef} (\bar{U} + u + \dot{x})^2, \quad (9)$$

onde \dot{x} é a velocidade da estrutura na direção da força.

Previamente à análise dinâmica, realiza-se a análise estática na qual é aplicada a força média calculada considerando a velocidade média sobre o intervalo de 10 minutos, \bar{U} . Para determinar as forças de vento atuantes na estrutura, a torre é decomposta em setores denominados painéis. Discretizada a estrutura, calculam-se então as forças para cada painel individualmente.

2.2 Forças Marítimas

Assim como a ação do vento, os esforços provenientes da ação de ondas e correntes são relativamente complexos em sua determinação, visto que são ações dinâmicas e atuam de forma combinada com distintas direções. Sendo este o caso crítico, será considerado que todas as forças (corrente, ondas e vento) atuam em uma mesma direção.

Para a determinação da força exercida pelas ondas, torna-se necessário o conhecimento dos campos de velocidades e aceleração das partículas de água do mar. Devido a não linearidade do movimento das partículas de água, existem várias teorias de onda para cálculo das velocidades e acelerações dessas partículas.

Morison (1950) propôs uma fórmula empírica para o cálculo da força de onda, sendo recorrentemente utilizada para o cálculo de estruturas *offshore*, onde são consideradas duas parcelas: uma referente à inércia (função da aceleração da onda) e outra referente ao arrasto (função da velocidade da onda). A equação de Morison é dada pela Equação (10).

$$F_o = F_i + F_a, \quad (10)$$

onde F_o , F_i e F_a são, respectivamente, as forças de onda, inércia e arrasto.

A força de arrasto F_a , por unidade de comprimento, exercida por um escoamento uniforme unidirecional de um fluido real com aceleração nula, incidindo sobre um cilindro estacionário, é dada por:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_a C_a D \dot{w}_o |\dot{w}_o|, \quad (11)$$

onde ρ_a é a massa específica da água; C_a é o coeficiente de arrasto da estrutura, ou parte da estrutura, da direção em que está sendo considerada a ação da onda; D é o diâmetro do cilindro e \dot{w}_o é a velocidade da onda.

Para o caso de escoamento uniformemente acelerado bidimensional de um fluido ideal incidindo sobre uma seção circular, atuará a força de inércia, por unidade de comprimento, resultante das pressões hidrostáticas com intensidade proporcional à aceleração da massa fluida, dada por:

$$F_i = \rho_a C_M \frac{\pi D^2}{4} \ddot{w}_o, \quad (12)$$

onde C_M é o coeficiente de inércia, ou parte da estrutura, da direção em que está sendo considerada a ação da onda; e \ddot{w}_o é a aceleração da onda.

As componentes de velocidade (\dot{w}_o) e aceleração (\ddot{w}_o) da onda da equação de Morison foram desenvolvidas por Airy (Sarpkaya *et al.*, 1981), e são dadas, respectivamente, pelas Equações (13) e (14).

$$\dot{w}_o = \frac{\pi H}{T_o} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} \cos\left(\frac{2\pi t}{T_o}\right), \quad (13)$$

$$\ddot{w}_o = \frac{2\pi^2 H}{T_o^2} \frac{\cosh\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)}{\sinh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_o}\right), \quad (14)$$

onde H é a altura da onda, T_o é o período de onda, λ é o comprimento de onda, d é a altura da lâmina d'água, x é a altura submersa do elemento analisado e t é o tempo.

Uma das principais características da Teoria de Airy é o decaimento exponencial das velocidades e acelerações com a profundidade, levando a valores nulos para profundidades maiores do que metade do comprimento de onda.

Para estruturas flexíveis, onde a velocidade e a aceleração da estrutura possuem valores significativos, a equação de Morison é modificada, usando-se a velocidade e a aceleração relativas entre o fluido e o cilindro. Assim a equação de Morison assume a seguinte forma (Sarpkaya *et al.*, 1981 apud Pinho, 2001):

$$F_o = \rho_a C_M \frac{\pi D^2}{4} \ddot{w}_o + \rho_a C_{\acute{a}gua} \frac{\pi D^2}{4} (\ddot{w}_o - \ddot{w}) + \frac{1}{2} \rho_a C_a D (\dot{w}_o - \dot{w}) |\dot{w}_o - \dot{w}|, \quad (15)$$

onde $C_{\acute{a}gua}$ é o coeficiente de massa adicional, \dot{w} e \ddot{w} são, respectivamente, a velocidade e aceleração da estrutura.

Assim como a ação do vento as velocidades e acelerações das ondas podem também ser desenvolvidas analisando-se os espectros de mar relacionados a região em que está localizada a estrutura, a exemplo do espectro de Jonswap (Hasselmann *et al.*, 1973), entretanto optou-se por adotar neste trabalho a Teoria de Airy.

Forças de corrente

O valor da aceleração pode ser desprezado no cálculo das forças de corrente, assim a equação que representa a equivalente estática da força de corrente é dada pela equação (16). As forças de corrente são aplicadas na mesma direção da ação da onda.

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_a C_a A_{co} V_c^2, \quad (16)$$

onde A_{co} é a área de obstrução da corrente; V_c é a velocidade de corrente.

A velocidade da corrente varia com a profundidade, podendo variar também sua direção. Podem ser adotados diferentes perfis para correntes, da mesma forma que podem ser adotados diferentes espectros de mar que dependem das características de cada região. Neste trabalho, foi adotado um perfil de corrente simplificado variando linearmente até o fundo mar, sendo seu valor máximo na linha d'água e zero no leito marinho.

3 CONTROLE E REDUÇÃO DE VIBRAÇÃO NAS ESTRUTURAS

Com o desenvolvimento tecnológico, os materiais utilizados na construção civil estão recorrentemente sendo aperfeiçoados, tornando possíveis estruturas cada vez maiores. Estas estruturas demasiadamente esbeltas se tornam mais suscetíveis a vibrações, e se não forem analisadas rigorosamente, podem acarretar em problemas de desempenho, danos ou até mesmo levar ao colapso da estrutura. Isto implica num custo importante e, muitas das vezes, impactante para a sociedade, seja pela necessidade de reconstrução das estruturas ou partes danificadas, seja pela interrupção das atividades fins da estrutura e até mesmo a perda de vidas humanas.

A resposta da estrutura e de seus componentes a solicitações dinâmicas é de fundamental importância, dado que o efeito de flutuação do carregamento tende a provocar variações de tensões no material. Cabe salientar que a capacidade de suportar estas variações diminui gradativamente com o número de flutuações, levando ao desenvolvimento e propagação de fissuras que se constitui no processo de fadiga. O dano devido ao efeito de fadiga depende da história completa das tensões durante toda a vida útil da estrutura, sendo seu cálculo e seus efeitos sobre o material de difícil determinação (Torres, 1984). O estudo de fadiga não é contemplado no presente trabalho. Contudo, sabe-se que com a redução dos deslocamentos, também serão reduzidas as magnitudes de variação das tensões, portanto, espera-se uma vida útil mais prolongada.

Este cenário justifica a importância de utilizar um dispositivo atenuador de vibrações. Além deste fato, a instalação de tal dispositivo permite uma otimização da estrutura, proporcionando economia de material e conseqüente redução de custos de fabricação, montagem e transporte.

Um sistema de controle passivo, acoplado a estrutura, possui a fundamental característica de gerar forças de inércia, elásticas e de amortecimento, opostas às forças atuantes na estrutura, fazendo com que o trabalho realizado pelas forças distribuídas seja reduzido.

A magnitude das forças de controle é obtida como função das propriedades do sistema de controle adotado, bem como das amplitudes de resposta (deslocamento, velocidade e aceleração) da estrutura, o que caracteriza o sistema como de ciclo fechado. A garantia de eficiência do sistema está associada a uma calibração prévia, desenvolvida com base nas características dinâmicas da estrutura e considerando um nível, predefinido, de redução de vibrações (Battista, 1993).

Tendo em vista a natureza do carregamento, que pode atuar em qualquer direção, os atenuadores do tipo coluna líquida (ACL) e sistema massa-mola-amortecedor (ADS) foram descartados, pois necessitariam de um sistema adicional que os posicione alinhados com o

carregamento. Um sistema constituído por um pêndulo invertido foi descartado devido à geometria da torre, que se afunila em direção ao topo, enquanto a amplitude de deslocamento do atenuador aumenta. Como solução será então empregado um atenuador pendular não linear (APNL) que apresentam significativa eficiência para redução de deslocamento horizontais por flexão em estruturas de torres.

3.1 Modelo Teórico

Seja x o deslocamento linear longitudinal à direção de aplicação de uma força F , para o oscilador de um grau de liberdade. A equação de movimento pode ser expressa como:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t), \quad (17)$$

onde M , C e K , são respectivamente, a massa, o amortecimento e a rigidez da estrutura; x , \dot{x} , \ddot{x} , são respectivamente, o deslocamento, a velocidade e aceleração da estrutura; e F é a força atuante na estrutura, função do tempo t .

Para a torre em estudo, a força dinâmica F é composta de três parcelas: a força devido a ação do vento, F_w , a força devido a ação das ondas, F_o , e a da corrente F_c :

$$F(t) = F_w(t) + F_o(t) + F_c(t), \quad (18)$$

Objetivando reduzir as respostas obtidas para o sistema original via Eq. (17), um pêndulo é conectado a estrutura, caracterizando o acoplamento de um sistema de absorção passivo. Dando origem a um novo sistema, composto de dois graus de liberdade, definidos em termos do deslocamento linear x e do deslocamento angular θ (Pinheiro, 1997). A Eq. (17) passa a ser definida em termos destes dois graus de liberdades, como (Pinheiro, 1997):

$$(M + m_p)\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + m_p l(\ddot{\theta} \cos(\theta) - \dot{\theta}^2 \sin(\theta)) = F(t), \quad (19)$$

onde m_p é a massa do pêndulo; l é comprimento da haste do pêndulo; $\ddot{\theta}$ é a aceleração angular do pêndulo e $\dot{\theta}$ é a velocidade angular do pêndulo.

Além da Eq. (17), uma nova equação é introduzida ao sistema, associada ao movimento do pêndulo, expressa por (Pinheiro, 1997):

$$m_p l^2 \ddot{\theta} + c_p \dot{\theta} + k_p \theta + m_p g \sin(\theta) + m_p l \ddot{x} \cos(\theta) = 0, \quad (20)$$

onde c_p é o amortecimento do pêndulo; g é aceleração da gravidade.

Dessa forma, as respostas para o novo sistema são dadas pelas Eqs. (19) e (20) acopladas.

A eficiência do APNL é função da faixa de deslocamentos angulares a ser considerada. Todavia, o comprimento da haste do pêndulo e o amortecimento do pêndulo, responsável por limitar o deslocamento horizontal do pêndulo, apresenta uma considerável influência nas respostas.

O comprimento do pêndulo é dado pela equação (21) (Pinheiro, 1997):

$$l_p = \frac{g}{w_p^2}, \quad (21)$$

onde w_p é frequência do pêndulo.

Os coeficientes de amortecimento c_p e de rigidez k_p são dados pelas equações (22) e (23), respectivamente (Pinheiro, 1997).

$$c_p = 2\xi_p m_p l_p^2 \omega_p, \quad (22)$$

$$k_p = m_p l_p (w_p^2 l_p - g), \quad (23)$$

onde ξ_p e m_p são, respectivamente a taxa de amortecimento e massa do pêndulo.

4 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO – CON-APNL

O programa Con-APNL permite analisar numericamente o comportamento de uma estrutura quando submetida forças provenientes da ação do vento e de ações marítimas, de ondas e de corrente. Desenvolvido em linguagem Fortran, a partir do programa de análise estrutural estática linear - ANEST (Battista *et al.*, 1993), o programa Con-APNL incorporou novas rotinas, desenvolvidas para permitir realizar a análise estática não linear, a análise dinâmica (Eq. (17)) pelo método da superposição modal, e análise dinâmica acoplada a um sistema atenuador passivo de pêndulo não linear (Eqs. (19) e (20)).

As forças estática e dinâmica aplicadas na estrutura são estabelecidas a partir de parâmetros predefinidos pelo usuário, o que permite simular diferentes condições de vento e de mar, conforme interesse do mesmo. Além disso, o programa está preparado para consideração de acréscimo de massa concentrada predefinido pelo usuário.

O programa realiza previamente uma análise de vibração livre, que permite obter os parâmetros modais da estrutura necessários para a análise dinâmica, sem e com atenuador. A resposta dinâmica do sistema é obtida numericamente, no domínio do tempo, via método de Runge-Kutta de quarta ordem. Ainda no que se refere a análise dinâmica, o programa Con-APNL fornece duas alternativas de aplicação de força, a consideração simplificada, de apenas uma das forças (de vento ou marítima), e a completa considerando todas.

Quanto aos parâmetros associados ao atenuador, a frequência e a massa do pêndulo são inseridas no arquivo de entrada, respectivamente, em relação à frequência e a massa modal para o modo fundamental de vibração, enquanto que a taxa de amortecimento é lida diretamente. De posse das referidas informações, são calculadas as propriedades do pêndulo: comprimento, coeficiente de amortecimento, e coeficiente de rigidez.

A força horizontal gerada pelo movimento do pêndulo e a aceleração do grau de liberdade onde o pêndulo está conectado devem ser multiplicadas pelo autovetor do grau de liberdade horizontal do nó onde está localizado o atenuador. Assim a força pode ser acoplada à equação da estrutura, que está na forma modal, e a aceleração modal pode ser acoplada à equação do pêndulo, que está na forma nodal.

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Descrição do modelo estrutural

A estrutura analisada corresponde a uma torre tubular metálica de 130 metros de altura formada por seção circular de alma vazada, sobre a qual se deseja instalar uma turbina eólica composta por nacele e 3 pás (Figura 1). A torre tem forma tronco-cônica circular, com seção cilíndrica nos 20m superiores. O diâmetro na base é 12m, reduzindo-se de forma linear até o valor de 3 metros na cota $z=110m$, seguindo constante até o topo.

A torre trabalha inundada de água até a altura de 50m, a massa da nacela é de 440ton e das pás de 35ton. O centro de gravidade do conjunto está sobre o eixo da torre. A taxa de amortecimento da estrutura foi assumida como igual a 1,0%.

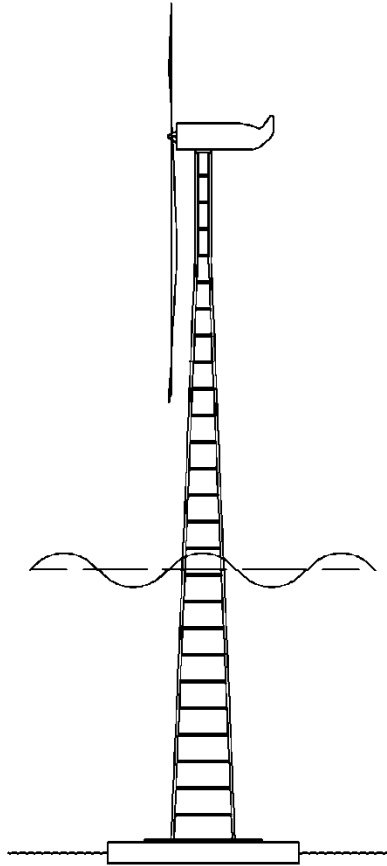


Figura 1. Modelo da torre analisada

A torre sofre ação de forças provenientes do mar e do vento. Para as forças oriundas do mar, considerou-se a força de uma onda com altura de 4,0 metros e período de 6,0 segundos agindo na cota $z=51,4m$ e corrente marítima com velocidade máxima de 1,68m/s. Para as forças oriundas do vento, considerou-se que a estrutura está situada em terreno de categoria de rugosidade I (mar aberto) e velocidade básica igual a 35m/s.

Para o modelo numérico, a torre foi discretizada em elementos com 2,5m de comprimento e para cada elemento foram adotadas as características de sua seção média. A massa de cada elemento submerso foi calculada de forma a se levar em consideração a massa de água deslocada, interna e externamente à torre, para isto foram obtidos valores de massa específica equivalente. Para cálculo do momento de massa da turbina foi considerada a massa do conjunto nacela-pás uniformemente distribuída em um prisma com altura de 5,0m, comprimento de 10,0m e largura de 1,0m.

A estrutura apresenta comportamento linear sob ação das forças de vento e marítimas. Dessa forma, pode-se realizar análise estática prévia para as forças geradas da velocidade média do vento e das correntes marítimas, e posterior análise dinâmica no domínio do tempo para as forças devidas a velocidade flutuante do vento e das ondas.

5.2 Avaliação da Necessidade de Instalação de Dispositivos de Controle Dinâmico

Inicialmente, realizou-se uma análise de vibração livre, obtendo-se as frequências e modos de vibração da torre, para quais os três primeiros modos de vibração resultaram em frequências de 0,32, 1,14 e 2,83Hz, respectivamente, cujas formas modais são mostradas na Figura 2.

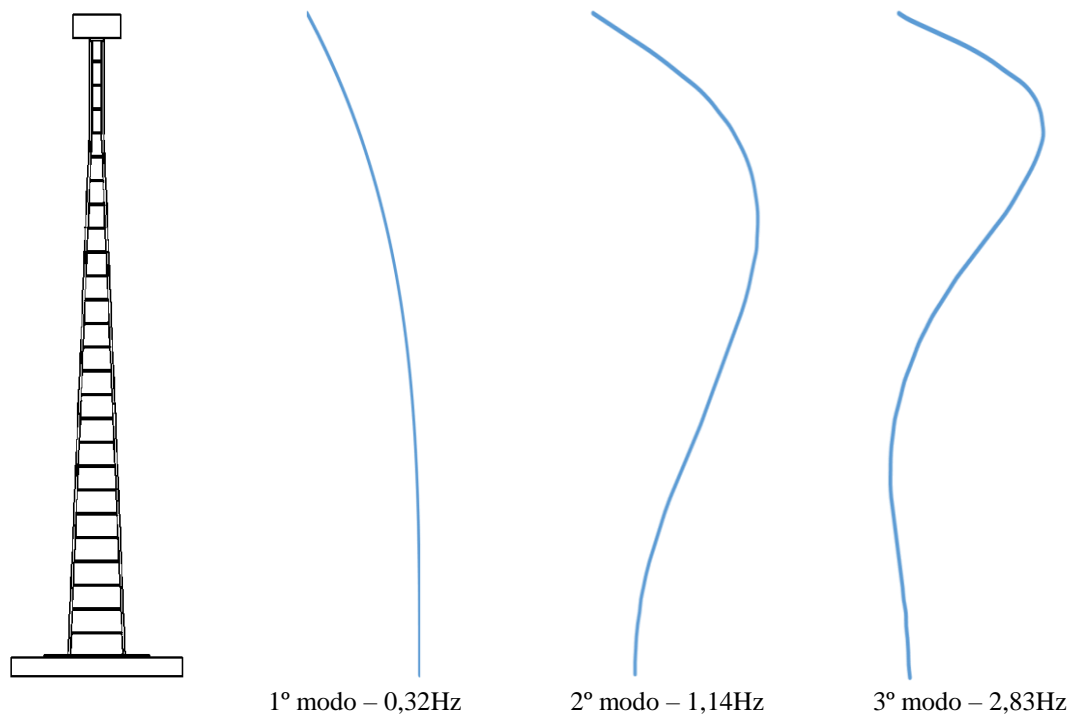


Figura 2. Formas modais dos três primeiros modos de vibração da torre

A Figura 3 ilustra o deslocamento no topo da torre ao longo do tempo quando submetida às forças marítimas e de vento. A análise foi realizada através do método da superposição modal. Verificou-se que em relação à uma análise com todas as forças sendo aplicadas de maneira estática o fator de amplificação foi igual a 1,5.

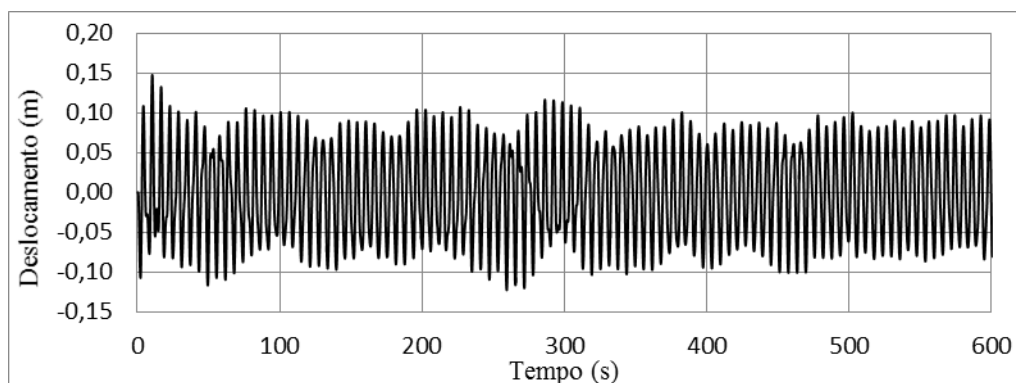


Figura 3. Deslocamento horizontal no topo da torre.

A Figura 4 mostra o auto-espectro obtido através da Transformada de Fourier do sinal de deslocamento no tempo. Como pode ser visto, a estrutura responde preponderantemente na frequência da excitação da onda e na faixa de maior energia do vento, sendo o modo

fundamental de vibração o mais excitado. Por esta razão, nas análises seguintes foram consideradas apenas a influência do primeiro modo.

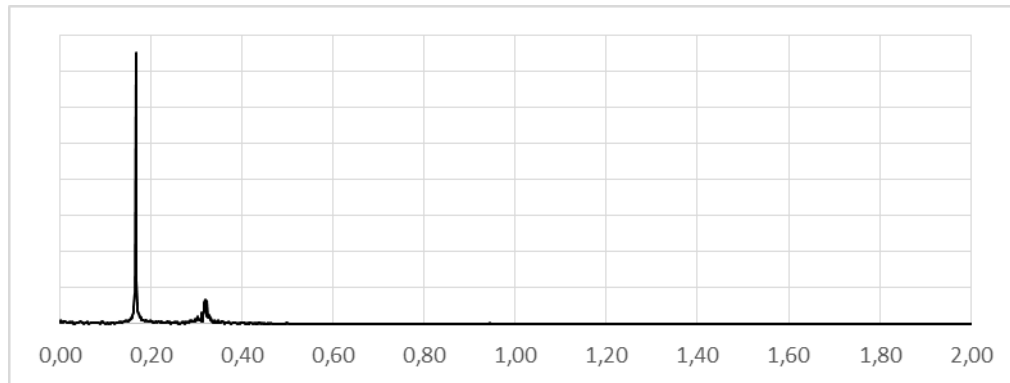


Figura 4. Espectro de resposta dos deslocamentos no topo da torre.

O desvio padrão dos deslocamentos é igual a 5,91cm. A resposta máxima esperada é obtida pelas equações (6) e (7). Assim, considerando o intervalo de tempo da estimativa igual a 600s, tem-se para a frequência dominante da resposta, o fator de pico g igual a 3,22, resultando no deslocamento máximo esperado no topo da torre igual a 21,49cm.

Os aspectos a serem avaliados para se definir a necessidade ou não de dispositivos de controle dinâmico são os deslocamentos da estrutura e as acelerações resultantes.

Como mostrado na Figura 3, na estrutura analisada os deslocamentos são pequenos e, conseqüentemente, induzem pequenas tensões. As acelerações não são motivos de preocupação, pois não se trata de uma instalação habitada.

Todavia, como o carregamento dinâmico possui período ínfimo em relação à vida de projeto da estrutura, ele se repetirá inúmeras vezes. Desta forma, torna-se interessante a instalação de um dispositivo de atenuação das vibrações, pois qualquer redução da amplitude de tensões proporcionará um significativo aumento do número de ciclos permitido.

A estrutura em análise é basicamente excitada em seu primeiro modo de vibração, devido as cargas consideradas. O segundo modo, assim como modos maiores frequência de vibração da torre, só serão excitados por ondas e ventos com baixa energia, portanto menos preocupantes. Cabe salientar que ondas com maior período, e mais energia, terão efeito semelhante ao de uma carga estática agindo sobre a estrutura, pois apresentam menores relações entre frequências e conseqüentemente menores fatores de amplificação dinâmica.

5.3 Estudo paramétrico para o dimensionamento do pêndulo

Realizou-se um estudo paramétrico do comportamento do pêndulo e, conseqüentemente, da influência deste sobre o comportamento da estrutura através de análise numérico.

Os objetos do estudo foram os seguintes:

- Relação entre a frequência do pêndulo (w_p) e a da estrutura (w_s) e por conseguinte a relação com a frequência da excitação predominante (w_e);
- Relação entre a massa do pêndulo (m_p) e a massa modal do modo fundamental da estrutura (m_s);
- Taxa de amortecimento do pêndulo (ζ_p).

A rigidez do pêndulo representa uma resistência à movimentação do mesmo, o que levaria a uma redução da força horizontal gerada pelo atenuador. Assim sendo, as análises serão feitas considerando a rigidez nula para o pêndulo, assim o sistema deve ser projetado e montado de forma a minimizar a força necessária para o deslocamento do pêndulo.

Nas análises seguintes não foram verificadas as possibilidades da instalação do pêndulo na torre em questão (verificação de impacto com as paredes), tal verificação será feita em uma etapa posterior. A variação dos parâmetros serve apenas para verificar suas influências no dimensionamento final do pêndulo.

Dimensionamento quanto às relações de frequência

Para a verificação da influência da relação entre a frequência do pêndulo (ω_p) e as frequências de vibração da estrutura (ω_s) e excitação (ω_e), foram gerados modelos, para os quais foram mantidos constantes o amortecimento do pêndulo (adotado igual a 1,0%) e sua massa (adotado 20% da massa modal do 1º modo de vibração da estrutura, $\approx 110,00\text{ton}$), também foi considerado que sua instalação se dá no topo da torre.

A Figura 5 mostra os coeficientes de controle (redução das vibrações) em relação às frequências do pêndulo e da estrutura. Por se tratar de uma resposta estocástica, os coeficientes de controle foram obtidos através da relação entre os desvios padrão das respostas com e sem o controlador (Eq. 24).

$$CC = \frac{\sigma_{\text{controlado}}}{\sigma_{\text{sem.controlado}}} \quad (24)$$

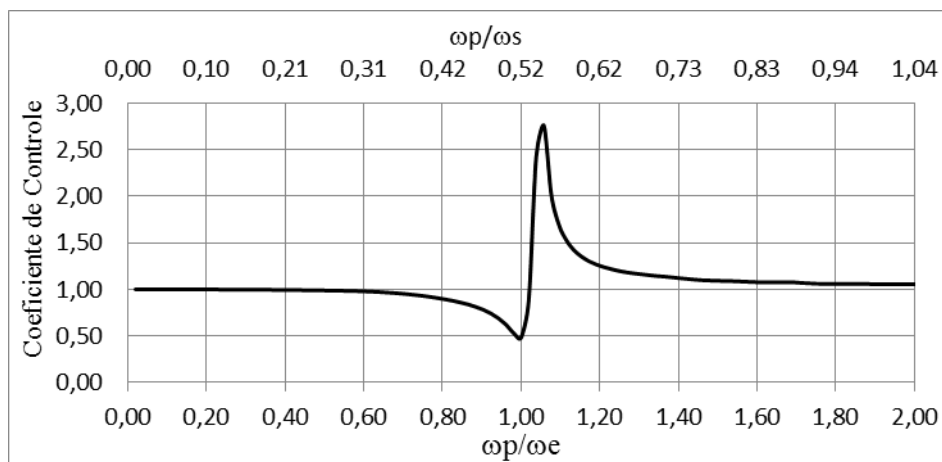


Figura 5. Coeficientes de controle para diferentes frequências do pêndulo

Como pode ser visto no gráfico da Figura 5, a relação entre a frequência do pêndulo e a frequência de excitação é fator determinante para atenuação das vibrações. Devendo-se, portanto, dimensionar o pêndulo em uma frequência próxima da frequência de excitação, numa razão um pouco menor que 1,0 para reduzir o risco de ocorrência de ampliações.

Observa-se que para razões de frequências maiores que 1,0 o pêndulo tem efeito contrário, aumentando ainda mais as amplitudes das oscilações, e para razões de frequências menores que 1,0 ainda ocorrem reduções, mas com eficiências menores. No entanto, verifica-se também que não é aconselhável dimensionar o atenuador com uma razão de frequências muito próxima a 1,0, haja vista se tratar de uma zona crítica, na qual pequenas variações de frequências resultam em grandes variações de coeficiente de controle.

Forças da natureza, como vento ou ondas, não possuem frequências bem definidas, assim deve-se conhecer as características locais destes fenômenos. Deve-se, também, realizar ensaios experimentais para ratificar as frequências da estrutura e do atenuador, bem como validar a eficiência do sistema. Objetiva-se, então, tentar dimensionar o pêndulo de modo a se obter maior eficiência (calibrando-o com as forças de frequências mais altas), mas com a devida cautela, uma vez que forças de frequências mais baixas podem amplificar a resposta.

A Figura 6 ilustra os deslocamentos horizontais do topo da torre em sua configuração inicial (sem controlador) e com a configuração que forneceu o melhor coeficiente de controle ($w_p/w_s=0,52$).

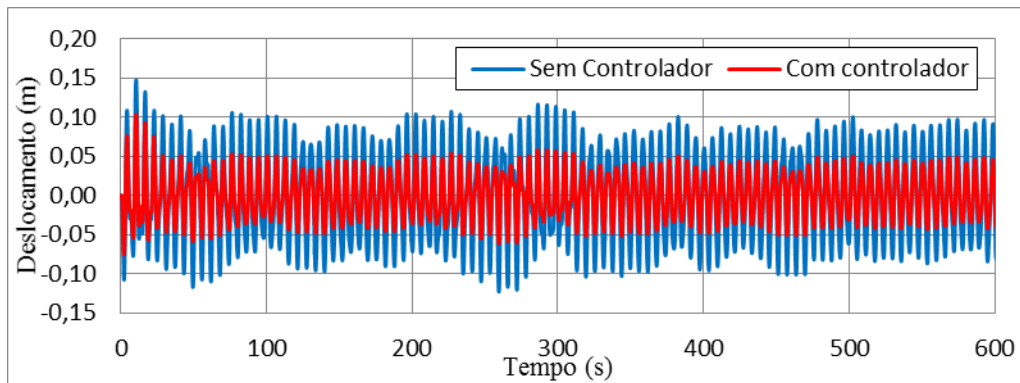


Figura 6. Deslocamento horizontal no topo da torre para $w_p/w_s = 0,52$

Dimensionamento quanto às relações de massa

Para verificação da influência da massa do pêndulo, adotou-se a razão entre sua massa (m_p) e a massa modal da estrutura (m_s) (≈ 550 ton.). Para tanto, foram gerados alguns modelos nos quais foram mantidos constantes o amortecimento do pêndulo (adotado igual a 1,0%), frequência igual a 50% da frequência fundamental da estrutura, considerando que sua instalação se dá no topo da torre. A Figura 7 ilustra os coeficientes de controle (redução das vibrações) em relação à massa adotada para o pêndulo.

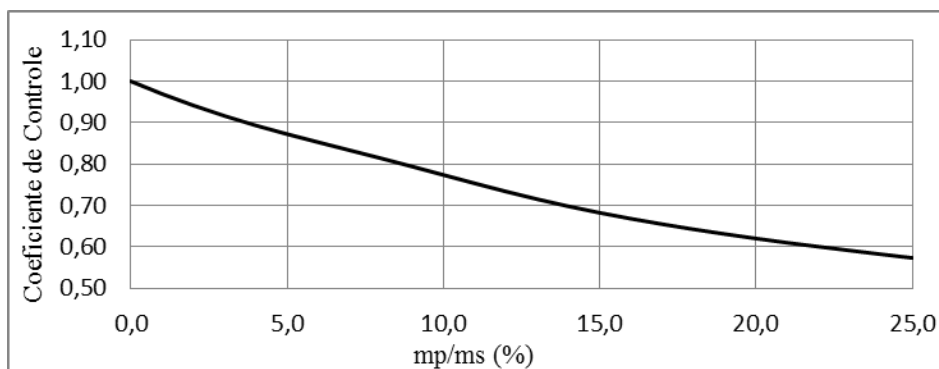


Figura 7. Coeficientes de controle para diferentes massas do pêndulo

Como visto na Figura 7, quanto maior a relação de massas melhor será o coeficiente de controle devido às maiores forças de inércia geradas, entretanto a adoção de massas expressivamente grandes, embora reduzam as amplitudes de deslocamento aumentam as tensões normais nos elementos localizados abaixo do ponto de conexão do pêndulo.

A Figura 8 apresenta os deslocamentos horizontais do topo da torre em sua configuração inicial (sem controlador) e com a massa do atenuador igual a 25% da massa modal do modo fundamental.

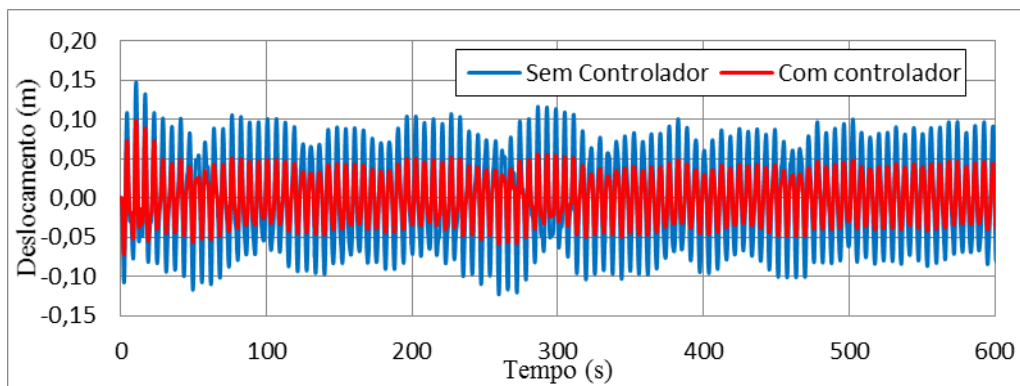


Figura 8. Deslocamento horizontal no topo da torre para $m_p/m_s = 25\%$

Outro fator importante é o espaço físico disponível para instalação do pêndulo, quando se aumenta a massa, conseqüentemente, aumenta-se o diâmetro necessário, reduzindo o espaço disponível para oscilação do pêndulo. O ideal é obter a menor relação de massas que gera os maiores deslocamentos, ou seja, na força de inércia gerada pelo pêndulo, objetiva-se obter maiores acelerações às maiores massas.

Dimensionamento quanto à taxa de amortecimento do pêndulo

Para verificação da influência da taxa de amortecimento do pêndulo foram gerados modelos para os quais se preservou constante a massa do pêndulo (adotada igual a 20% da massa modal, $\approx 110,0$ ton.) e frequência igual a 50% da frequência fundamental da estrutura, também foi considerado que sua instalação se dá no topo da torre. A Figura 9 mostra os coeficientes de controle (redução das vibrações) em relação à taxa de amortecimento do pêndulo.

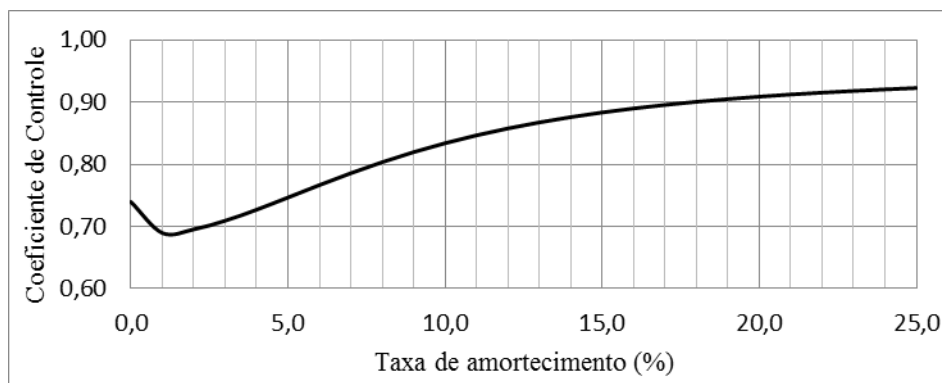


Figura 9. Coeficientes de controle para diferentes taxas de amortecimento do pêndulo

Quanto ao amortecimento do pêndulo (Coeficiente de amortecimento, c_p), para taxa de amortecimento nula, o pêndulo não é muito efetivo uma vez que perde a fase várias vezes. Ao aumentar gradativamente a taxa de amortecimento, esse efeito vai decaindo até ser obtida maior eficiência do sistema entre 1,0 e 3,0% de amortecimento. Aumentando-se ainda mais o amortecimento a eficiência começa a reduzir até torna-se nula, devido ao fato que com o aumento do amortecimento o pêndulo oscila cada vez menos.

5.4 Dimensionamento do Atenuador Pendular Não Linear

Como visto anteriormente, a estrutura vibra predominantemente no seu primeiro modo. Devido à natureza da estrutura, a forma de vibração definida por seus autovetores associado ao 1º modo de vibração apresenta valores maiores quanto mais se aproxima do topo da torre, a eficiência do pêndulo será maior quanto mais próximo ele estiver do ponto mais alto. O que já era esperado, justificando a escolha de posicionar o pêndulo no topo da torre para as análises anteriores.

O comprimento do pêndulo foi determinado para que sua frequência natural fosse igual a 95% da frequência de excitação predominante, resultando em comprimento de 9,91m e frequência igual a 0,158Hz.

Para determinação dos demais parâmetros foi realizado novo estudo paramétrico para obter a configuração ótima do sistema, sendo avaliada agora a possibilidade de instalação do APNL dentro da torre, sem que o mesmo impacte com as paredes. Para tanto, considerou-se a massa do pêndulo em formato esférico e constituída de aço. Assim, variaram-se as configurações quanto à altura de instalação, massa e taxa de amortecimento do pêndulo.

A Tabela 1 apresenta, para os parâmetros avaliados, os valores iniciais e finais e a variação dos mesmos.

Tabela 1. Parâmetros do pêndulo avaliados no estudo paramétrico

Parâmetro	Valor inicial	Valor final	Variação
Altura de instalação (m)	130 (topo)	80	-2,5
Taxa de amortecimento (%)	0,5	3,0	0,1
Massa/(massa modal da estrutura) (%)	5,0	15,0	0,5

A Tabela 2 mostra os melhores resultados dentre aqueles obtidos na análise.

Tabela 2. Melhores resultados para as características do pêndulo

Modelo	Altura de Instalação (m)	Massa do Pêndulo (kg)	Taxa de Amortecimento do APNL	$\frac{\sigma_{controlado}}{\sigma_{sem.controle}}$	Redução %
1	117,5	82.940	0,014	0,7974	20,27
2	117,5	82.940	0,016	0,7974	20,26
3	117,5	82.940	0,018	0,7987	20,13
4	117,5	82.940	0,012	0,7989	20,11
5	117,5	82.940	0,020	0,8008	19,92
6	117,5	82.940	0,010	0,8027	19,73
7	117,5	82.940	0,022	0,8036	19,64
8	117,5	82.940	0,024	0,8074	19,26
9	117,5	77.411	0,014	0,8075	19,25
10	117,5	77.411	0,016	0,8077	19,23

O modelo selecionado para a torre foi o de número 1 da Tabela 2. O comprimento do pêndulo foi 9,91 m, seu diâmetro igual a 2,76 m e sua frequência natural 0,158 Hz. A Figura 10 mostra os deslocamentos no topo da torre para a configuração adotada.

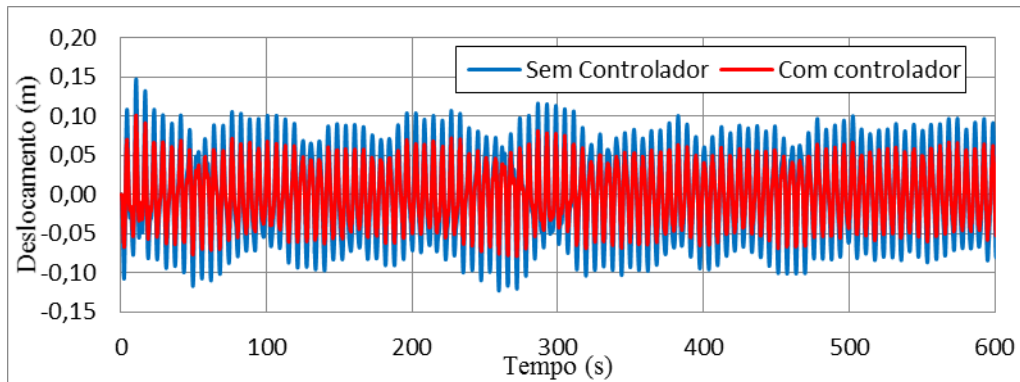


Figura 10. Deslocamento horizontal no topo da torre para o modelo final

Ratifica-se que reduções nos deslocamentos, geram reduções nos esforços internos e consequentemente nas tensões desenvolvidas ao longo da torre, permitindo-se assim uma possibilidade de maior vida útil dado o ganho em termos de número de ciclos necessários para que ocorra a fadiga do material. A figura 11 mostra as tensões desenvolvidas na base da torre para os modelos com e sem controlador.

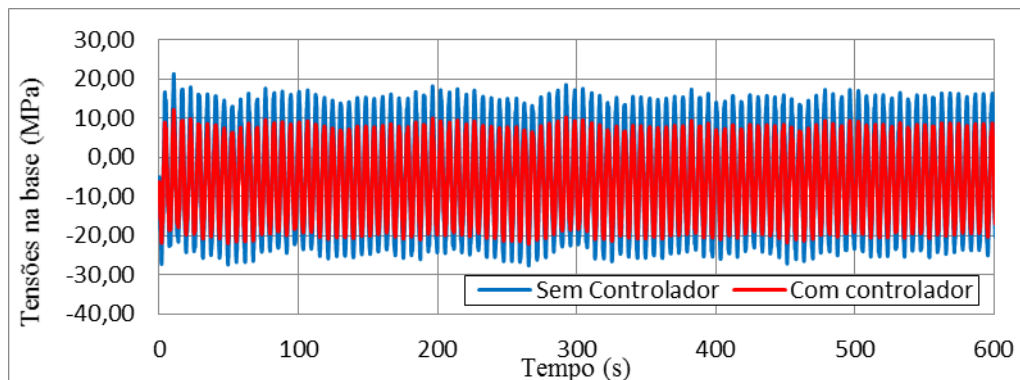


Figura 11. Tensões normais na base da torre

Para uma determinada variação de tensões, a estrutura resiste a um certo número de ciclos, e com a redução destas tensões através da instalação do atenuador pendular não-linear, a estrutura resistirá um maior número de ciclos (comportamento característico expresso pela curva S-N do material). Desta maneira, consegue-se aumentar a vida útil da estrutura, em termos de fadiga do material.

6 CONCLUSÃO

Apresentou-se neste trabalho uma avaliação das respostas de modelos numéricos de uma torre *offshore* projetada para suportar um aerogerador. As análises foram efetuadas por meio de um programa computacional de análise estrutural pelo método dos elementos finitos para elementos reticulados, com rotinas próprias para cálculo de forças de vento, forças marítimas e atenuador de vibrações do tipo APNL.

Através do estudo paramétrico realizado, pode-se avaliar que o APNL é mais eficiente quando dotado de uma frequência natural igual à frequência dominante do carregamento. Todavia, não é aconselhável dimensioná-lo deste modo, dada a grande variação do coeficiente de controle para uma relação pouco maior que 1,0.

Verificou-se ainda que a eficiência do APNL cresce com a massa do pêndulo, uma vez que maior massa representa mais força de controle. Entretanto, do ponto de vista prático, a massa do APNL não deve ser significativa em relação à massa da estrutura.

No que se refere a taxa de amortecimento para o pêndulo, verificou-se que esta deve ser menor que 0,10, e não nula. Vale ainda ressaltar que o amortecimento do pêndulo tem grande influência em sua amplitude de oscilação, podendo, portanto, ser utilizado para controlar sua oscilação a depender do espaço físico disponível.

Em suma, no dimensionamento de um APNL, o principal parâmetro a ser determinado é sua frequência de oscilação, devendo estar próxima à frequência de excitação. Para frequências de excitação menores que a da estrutura, pode-se ainda adotar um valor menor que a de excitação, entretanto sua eficiência será menor. Por sua vez se a frequência do pêndulo for maior que a de excitação o efeito poderá ser contrário, havendo amplificação das respostas.

Ressalta-se que a ação do vento sobre as pás do aerogerador que foi considerada apenas de maneira estática, se levada em consideração de forma dinâmica também poderia gerar ressonância entre as pás da turbina e a torre, requerendo um novo estudo, o que não é foco do presente trabalho.

REFERENCES

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR6123: Forças Devidas ao Vento em Edificações, 1985, Rio de Janeiro.

Amarante, O. A. C., Zack, J., Brower, M., Sá, A. L., 2001. *Atlas Eólico Brasileiro*, Brasília.

Battista R.C., Pfeil M.S., Alves R.V., 1993, *Notas de aula do curso de Análise Estrutural* do Instituto COPPE/UFRJ. Revisada em 2011.

Battista, R. C., 1993. *Redução e Controle de Vibrações em Estruturas*, Notas de aula. Revisada em 2011.

Battista, R., 2009. *Aeroelasticidade e controle dinâmico estrutural de turbinas eólicas de eixo horizontal*. Relatório Técnico, projeto CNPq. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

Blessmann, J., 1995. *O vento na engenharia estrutural*, 1ª ed., Editora da Universidade UFRGS, Porto Alegre, RS.

Buchholdt, H. A. I., Iannuzzi, A., Spinelli, P., 1985. *Time domain dynamic response of slender structures to wind loading*. Asia Pacific Symposium on Wind Engineering, University of Roorkee, Roorkee, India.

Buchholdt, H. A. I., 1998. *Introduction to cable roof structures*. 2.ed. Ed. Thomas Telford Ltda.

Davenport A.G., The application of statistical concepts to the wind loading of structures, In: *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, pp. 449-472, 1961.

- ESDU, 2001. *85020 - Characteristics of atmospheric turbulence near the ground - Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere)*. Engineering Sciences Data Unit, London.
- Eurocódigo 1, 2005. *Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions*. The European Standard EN 1991-1-4.
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J. A., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Krusemann, P., Meerburg, A., Müller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Deutsches Hydrographisches Institut. Hamburg Z. Suppl., A8 (12). 95 p.. 1973
- Melo, E., 2013. *Fonte eólica de energia: aspectos de inserção, tecnologia e competitividade*. Estud. av. vol.27 no.77 São Paulo.
- Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., Schaaf, S. A., *The force exerted by surface waves on piles*. *Journal of Petroleum Technology*, Vol. 2, Number 5, pp.149-154, 1950.
- Pinheiro, M. A. S., 1997. *Absorção Pendular Não-Linear Para Redução de Vibração em Torres Esbeltas*. Dissertação de M.Sc COPPE/UFRJ/ Rio de Janeiro.
- Pinho, A. L. S., 2001. *Redução de tensões em risers rígidos de plataformas TLP*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ/ Rio de Janeiro.
- Rivera, J. S. T., 2013. *Aerodinâmica do Sistema Torre - Turbina Eólica de Eixo Horizontal*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ/ Rio de Janeiro.
- Sarpkaya, T., Isaacson, M., 1981. *Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures*. Van Nostrand Reinhold Company.
- Simiu, E., Scanlan, R., *Wind Effects on Structures: an introduction to wind Engineering*. 3ª edição. New York: John Wiley & Sons Inc., 1996.
- Torres, A. L. F. L., 1984. *Determinação da fadiga em estruturas metálicas soldadas submetidas a solicitações dinâmicas*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ/ Rio de Janeiro.