



OTIMIZAÇÃO DE TORRES METÁLICAS PARA SUPORTE DE GERADORES EÓLICOS

Denis Cressebene da Rocha

Marcelo Araujo da Silva

deniscr01@gmail.com

marcelo.araujo@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC

Rua Arcturus, 03 (Jd Antares) – Edifício Delta – Sala 386, CEP: 09606-070, São Bernardo do Campo-SP., Brazil

Reyolando M.L.R.F. Brasil

reyolando.brasil@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC

Resumo. Neste trabalho estudou-se e implementou-se computacionalmente a otimização de estruturas de torres metálicas para suporte de turbinas conversoras de energia eólica, submetidas ao carregamento dinâmico do vento. As massas das estruturas foram minimizadas. O problema de minimização da massa é um problema de otimização. Para a realização da otimização foram utilizados programas desenvolvidos pelos autores e o Solver do Excel. As variáveis de projeto dos problemas de otimização serão as propriedades geométricas dos elementos estruturais. Na avaliação da função objetivo, foi considerada a massa da estrutura. Foram aplicadas restrições relacionadas com as resistências, deslocamentos e frequências de vibração da estrutura. Nos casos analisados, as estruturas das torres foram modeladas como elementos finitos de barras. Em particular, foi realizada uma análise dinâmica utilizando-se o modelo simplificado de Silva et al (2013), onde a resposta dinâmica é obtida pela multiplicação dos resultados da análise estática por um escalar que é função da altura e da primeira frequência de vibração natural da estrutura, bem como da rugosidade do terreno e do fator de amortecimento.

Palavras-chave: Otimização, análise dinâmica linear, torres metálicas

1 INTRODUÇÃO

A otimização é responsável, entre outras funções, pela minimização de custos. Nesse trabalho, os exemplos incluem o design de grandes estruturas, projetadas em aço, submetidos a carregamentos dinâmicos. Mais especificamente torres para suporte de turbinas geradoras, aqui chamadas torres para turbina eólica (TTV).

Um dos meios mais limpos de produzir energia é converter a força mecânica dos ventos em energia elétrica. As estações de força para produção desse tipo de energia não atacam significativamente o meio ambiente, exceto pela presença física e outras considerações que serão feitas nesse trabalho. Os custos de produção de energia elétrica vinda dos ventos é 50% maior do que a produzida por hidrelétricas, porém esse custo pode ser reduzido se existir investimentos e a melhora no design das estruturas tornando-as mais eficientes econômicas.



Figura 1. Torre de turbina eólica

A energia eólica é ainda pouco explorada e pode ser melhor aproveitada para auxiliar no abastecimento elétrico do país. A energia proveniente dos ventos é um abundante recurso de energia renovável, limpa e disponível em diversas localidades do território nacional. O uso desse recurso para geração de eletricidade em escala comercial iniciou há não mais do que 30 anos, com uso de conhecimentos aeronáuticos. No início da década de 70, com a crise do petróleo, houve grande interesse de países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que diminuísse a dependência do petróleo. Mais de 50000 empregos foram criados e uma sólida indústria de equipamentos e componentes foi desenvolvida. Atualmente, a indústria de turbinas eólicas tem acumulado crescimentos de 30% ao ano e movimentando mais de dois bilhões de dólares em vendas por ano. Existem mais de 30000 turbinas eólicas de grande porte em funcionamento no mundo com capacidade instalada na ordem de 13500 MW. No âmbito do comitê Internacional de Mudanças Climáticas, é projetada a instalação de 30000 MW até o ano de 2030. Na Dinamarca 12% da energia elétrica provém dos ventos, no norte da Alemanha em torno de 16% e a União

Europeia tem o objetivo de gerar 10% de toda a eletricidade a partir do vento (Wind Blatt, 2005).

No Brasil, estudos comprovaram que várias áreas pelo território nacional possuem ventos com velocidades passíveis de gerar eletricidade. A capacidade instalada no Brasil é de 20,3 MW (dados de 2004), com turbinas de médio e grande porte conectadas a rede elétrica nacional. Ainda, muitas turbinas de vento de pequeno porte funcionam isoladas para diversas aplicações – carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural.

Como foi dito, a base de operação da energia cinética dos ventos (causada pelo movimento das massas de ar na atmosfera) para energia mecânica (rotação das lâminas do rotor da turbina), a qual é transformada em energia elétrica pelos geradores eletromagnéticos. As lâminas das turbinas modernas são equipamentos aerodinâmicos, as quais possuem funções similares as hélices de aviões. A torre é o elemento que suporta o rotor e as hélices em um nível apropriado para operação da turbina de vento (Figura 1). A torre é um item estrutural de grande custo. As torres com alturas superiores a 40 m são auto-portantes e o modelo estrutural adotado é de um cantiléver (viga engastada e em balanço).

Ventos com baixas velocidades não possuem energia suficiente para movimentar as lâminas. Isso se inicia a partir de ventos atinge um valor mínimo, que normalmente tem valores entre 2,5 e 4,0 m/s. Com o aumento da velocidade do vento a potência aplicada na lâmina aumenta até atingir a potência nominal da máquina, a qual acontece com ventos de velocidade nominal em torno de 9,5 a 15,0 m/s. Ventos com velocidades maiores que 20 m/s podem causar danos à estrutura. Para essas velocidades o rotor usa freios para parar de girar. A energia disponível varia de acordo com o quadrado da velocidade dos ventos. A análise estrutural foi realizada para a velocidade máxima de acordo com a norma NBR-6123 (ABNT, 1988). De acordo com esta, a velocidade máxima de ventos em algumas áreas do Brasil, pode atingir 51 m/s. No presente trabalho foram consideradas velocidades máxima dos ventos igual a 30, 35, 40 e 45 m/s.

Os impactos ambientais são ilustrados a seguir

- estético: as turbinas de grande porte são objetos de grande visibilidade e interferem significativamente na paisagem natural.

- ruído: turbinas de grande porte geram grandes ruídos auditivos, por isso é necessário checar regulamentos para instalação em áreas povoadas.

- sombras e reflexos: as pás produzem sombras ou reflexos que podem ser indesejados em áreas residenciais. Esse problema é mais evidente em áreas de grandes latitudes.

- pássaros: em fazendas de produção eólica pode haver grande mortalidade de pássaros pelo choque com as pás, por isso não é recomendável a instalação de torres em rotas de migração de pássaros.

No presente trabalho foram realizadas a otimização da massa de torres de 40, 60 e 100 metros de altura. Para as torres de até 60 metros de altura as restrições de tensões prevaleceram e para torres de 100 metros de altura a restrição da frequência de vibração natural de vibração governa o problema.

Este trabalho apresenta os resultados iniciais de uma pesquisa em andamento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como já citado, o objetivo desse trabalho é descrever um procedimento para a otimização de torres metálicas para suporte de geradores eólicos, utilizando-se uma metodologia simplificada, desenvolvida pelos autores, para a realização da análise dinâmica linear. Primeiramente, o modelo dinâmico linear é apresentado. Esse modelo se baseia no modelo dinâmico discreto do código NBR-6123 (ABNT, 1988) e nos trabalhos de Silva et al (2013) e Brasil e Silva (2015). No modelo, a resposta dinâmica é determinada pelo produto da resposta estática por uma função escalar que depende da altura da torre, da primeira frequência natural de vibração, da rugosidade do terreno e do fator de amortecimento. Em seguida, o problema de otimização é apresentado, contendo descrição da estrutura, a formulação do problema e os resultados obtidos. Por último, são apresentadas conclusões acerca desse trabalho e são dadas sugestões para trabalhos futuros.

Para resolver os problemas discutidos aqui, é necessário utilizar-se de avançadas ferramentas e modelos, como otimização utilizando-se o método do gradiente reduzido do Solver do Excel, o método dos elementos finitos, análise dinâmica linear, projeto de estruturas metálicas e carregamento do vento. Os principais efeitos são devidos aos esforços internos de momento fletor, força cortante e força axial de compressão.

3 ANÁLISE DINÂMICA

3.1 Análise Estática

De acordo com o código NBR-6123 (ABNT, 1987), V_0 (m/s) é a velocidade média computada com base em um intervalo de 3 s, em 10 m no nível do solo, para um terreno plano e sem ondulações, e um período de retorno de 50 anos. O fator topográfico é S_1 , enquanto o fator de rugosidade do terreno é S_2 , dado por

$$S_2 = bF_r(z/10)^p \quad (1)$$

onde b , p e F_r são fatores que dependem das características do terreno, e z é a altura acima do nível do terreno em metros. O fator estatístico é S_3 . Os fatores S_1 , S_2 e S_3 são dados no código brasileiro NBR-6123 (ABNT, 1987). As características da velocidade (m/s) e pressão (Pa) do vento são, respectivamente

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad \text{e} \quad q = 0.613 V_k^2 \quad (2)$$

O carregamento do vento (N) na área (A) (projeção em um plano vertical de uma dada área de um objeto em m^2 é considerada como

$$F = C_a A q, \quad (3)$$

onde C_a é o coeficiente aerodinâmico, também presente no código brasileiro NBR-6123 (ABNT,1987).

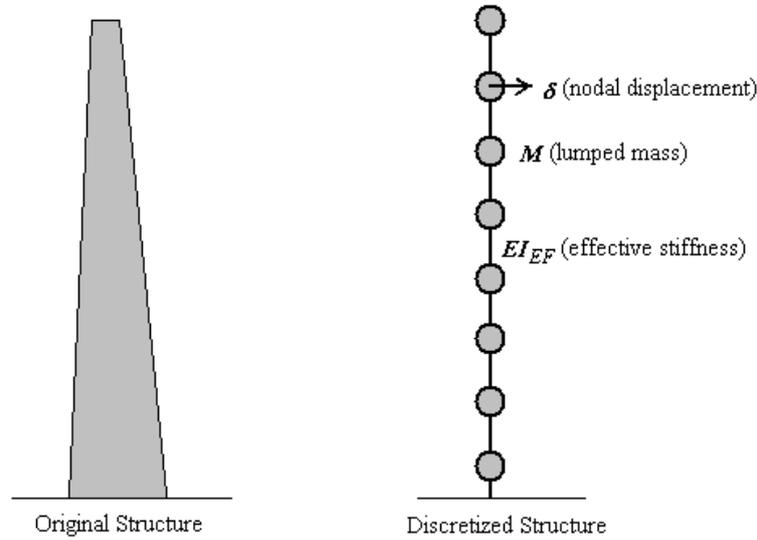


Figura 2. Típica TTV: estrutura original e discretizada

3.2 Análise Dinâmica Linear

Se a primeira frequência natural de vibração de uma dada estrutura é menor do que 1 Hz (ABNT, 1987), é necessário proceder com a análise dinâmica da estrutura. De acordo com NBR-6123 (ABNT, 1987), a análise dinâmica se procede da seguinte maneira. Para o j -ésimo grau de liberdade, o carregamento total X_j , devido ao vento sobre a torre, é a soma do carregamento médio com o flutuante, dado como:

$$X_j = \bar{X}_j + \hat{X}_j. \quad (4)$$

A carga média \bar{X}_j é dada por

$$\bar{X}_j = \bar{q}_o b^2 C_j A_j \left(\frac{z_j}{z_r} \right)^{2p}, \quad (5)$$

onde

$$\bar{q}_o = 0.613 \bar{V}_p^2 \quad \text{e} \quad \bar{V}_p = 0.69 V_0 S_1 S_3 \quad (\bar{q}_o \text{ em } N/m^2 \text{ e } \bar{V}_p \text{ em } m/s), \quad (6)$$

e b e p são dados na tabela 20 de NBR-6123 (ABNT, 1987), z_r é o nível de referência, utilizado como 10 m nesse trabalho; \bar{V}_p representa a velocidade do vento durante 10 minutos em 10 m no nível do solo para terreno acidentado (S₂) para categoria II.

A componente flutuante \hat{X}_j na Eq. (4) é dada como

$$\hat{X}_j = F_H \psi_j \varphi_j \quad (7)$$

onde

$$\psi_j = \frac{m_j}{m_o}, \quad F_H = \bar{q}_o b^2 A_o \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^n \psi_i \varphi_i^2} \xi, \quad \beta_i = C_{ai} \frac{A_i}{A_o} \left(\frac{z_i}{z_r} \right)^p \quad (8)$$

E m_i , m_o , A_i , A_o , ξ e C_{ai} , respectivamente, são a massa concentrada no i -ésimo grau de liberdade, a massa de referência, a área de referência, o coeficiente dinâmico de amplificação dado nas figuras 14 e 18 de ABNT (1987), e o coeficiente aerodinâmico para área A_i .

Note que $\boldsymbol{\varphi} = [\varphi_i]$ é um dado modo de vibração. Para se obter φ_i e ξ , é necessário considerar a massa e a rigidez da estrutura e resolver o problema de auto-valor $\det(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) = 0$, onde ω são as frequências naturais de vibração da estrutura, \mathbf{K} a matriz de rigidez e \mathbf{M} a matriz de massa da estrutura. A frequência natural se relaciona com a frequência cíclica através da expressão $\omega = 2 \pi f$. A massa concentrada pode ser facilmente calculada somando-se as massas ao redor da região de influência do nó. A rigidez depende do momento de inércia da seção transversal e do módulo de elasticidade E_s .

Para um dado vetor \hat{Q}_i que representa uma certa quantidade como cargas internas, tensão etc., devido ao i -ésimo modo natural de vibração, a contribuição total \hat{Q} , até o modo r , é calculada aqui como

$$\hat{Q} = \left[\sum_{k=1}^r \hat{Q}_k^2 \right]^{1/2}, \quad \text{enquanto } Y_i = \frac{1}{3} X_i \quad (9)$$

é a carga transversal devido à variação da direção do vento.

3.3 Análise Dinâmica Simplificada

É muito usual a utilização de estruturas esbeltas para o suporte de geradores eólicos. Uma característica básica dessas estruturas é o baixo valor da primeira frequência natural de vibração. Como já citado, no caso de a primeira frequência de vibração ser menor que 1 Hz, é necessário que se proceda à análise dinâmica dessas estruturas. Cargas dinâmicas devidas ao vento são extremamente importantes nesses casos.

O objetivo desta seção é mostrar uma metodologia, na qual, a partir da primeira frequência natural de vibração (f_1), a altura total da estrutura (H) e o momento fletor

característico provocado pelo vento (M_k^e), calculado pelo método estático da norma NBR-6123:1988 (Seção 6.2), pode-se calcular o momento fletor dinâmico por meio da equação

$$M_k^{din} = \gamma_d M_k^e \quad \text{onde} \quad \gamma_d = \gamma_d(H, f_1). \quad (10)$$

Já, utilizando a força cortante estática V_k^e e γ_d , pode-se calcular a força cortante dinâmica (Brasil e Silva, 2015) como

$$V_k^{din} = [(1 + \gamma_d) / 2] V_k^e. \quad (11)$$

A variável γ_d é denominada de coeficiente de majoração dinâmica. Ela representa a razão entre os valores dinâmico e o estático e é função da altura total da estrutura e da primeira frequência natural de vibração.

No trabalho de Silva et al (2013), γ_d é representado linearmente pela função

$$\gamma_d = \alpha_1 + \alpha_2 H + \alpha_3 f_1 \quad (12)$$

onde α_1 , α_2 e α_3 são constantes mostradas na Tabela 1 para diferentes valores de S_2 (categoria de terreno) e ζ (taxa de amortecimento).

Tabela 1 – Valores de α_1 , α_2 e α_3 para diferentes valores de S_2 e ζ

Categoria (S_2)	ζ	α_1	α_2	α_3
II	1,0%	1,635324	0,003093	-0,220680
III	1,0%	1,393851	0,004403	-0,168990
IV	1,0%	1,193900	0,004552	-0,139560
II	1,5%	1,592341	0,002299	-0,208510
III	1,5%	1,361500	0,003594	-0,163390
IV	1,5%	1,172087	0,003751	-0,140040

Estes valores tabelados foram obtidos pelos autores Silva et al (2013) processando, com auxílio de técnicas de otimização, os resultados da análise dinâmica de 90 torres de telecomunicações em concreto armado, instaladas em todo o território brasileiro. Essas expressões são bastante confiáveis para frequências (f_1) entre 0,15 e 0,5 Hz e para torres com alturas de até 60 m. Para alturas acima de 60 m é aconselhável restringir o valor de γ_d a 1,4, por exemplo. É válido lembrar que essas expressões referem-se às cargas devidas ao vento. No caso da combinação de diversos tipos de carregamentos, o coeficiente de majoração dinâmica somente deve ser aplicado aos esforços internos oriundos das cargas devidas ao vento.

A Figura 3 mostra o plano $\gamma_d = \gamma_d(H, f_1)$ para o caso de $\zeta = 1\%$ e $S_2 =$ Categoria IV. No trabalho de Silva et al (2013) são mostradas os planos para todas as seis situações da Tabela 1.

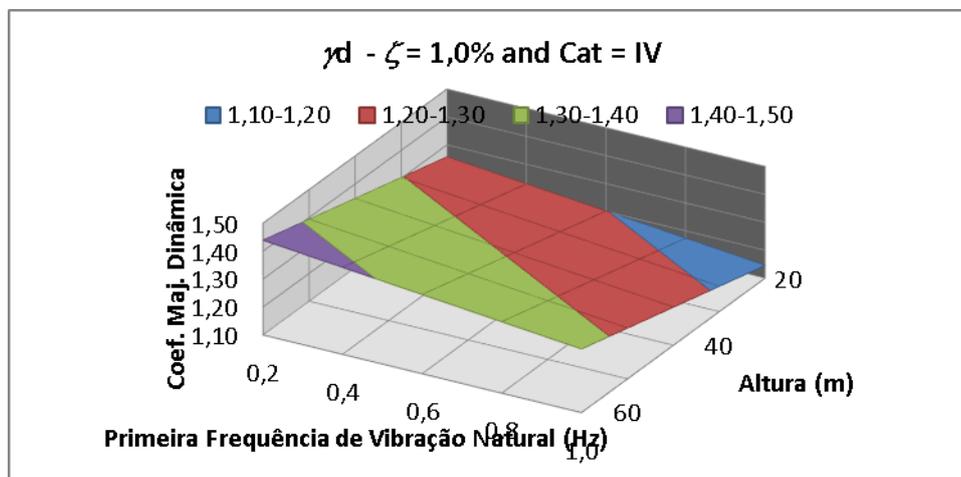


Figura 3. Coeficiente de majoração dinâmica para terrenos de Categoria IV ($S_2 = IV$) e taxa de amortecimento (ζ) igual a 1%.

4 OTIMIZAÇÃO

4.1 Características da estrutura

Nesse trabalho foram consideradas informações reais sobre turbinas eólicas disponíveis no mercado. Foram adotadas as características do V80-2.0 MW feito por Vestas S.A. As estruturas metálicas adotadas possuem 40, 60 e 100 metros de altura, tendo seção circular vazada. O diâmetro e a espessura variam de acordo com a altura da torre. A tensão de escoamento de projeto do aço é $f_{yd} = 0.9 \times 250$ MPa e módulo de elasticidade é $E_s = 210$ GPa.

Uma estrutura, similar àquela mostrada na Figura 2, é discretizada com 40 elementos e 41 nós, e o primeiro elemento inicia no primeiro nó e finda no segundo, o segundo elemento inicia no segundo nó e finda no terceiro, e assim sucessivamente. Com essa discretização, a estrutura possui 240 graus de liberdade. O vetor deslocamento correspondente aos graus de liberdade também é denotado como variável de estado.

Foram consideradas as velocidades básicas do vento $V_0 = 30, 35, 40$ e 45 m/s, o fator topográfico $S_1=1$, rugosidade do terreno S_2 como categoria II e o fator estatístico $S_3=1.1$.

Como apresentado anteriormente, a força devida ao vento na área A é $F = C_a A q$, onde C_a é o coeficiente aerodinâmico e q a pressão do vento. Equipamentos são instalados na estrutura, como turbinas, pás, escada interna, luz noturna e sistema de proteção contra descargas atmosféricas. Os valores de A e C_a para equipamentos são:

- torre, $0 \leq z \leq H$, $A =$ “variável de acordo com o projeto” e $C_a = 0.6$;
- turbina e pás, $z = H$, $A = 120 \text{ m}^2$ e $C_a = 1$.

Com essas áreas e coeficientes aerodinâmicos, a massa da torre é considerada distribuída pela torre proporcionalmente ao volume e isso pode ser calculado utilizando-se densidade igual a 7850 kg/m^3 . As massas de outros componentes foram consideradas 40 kg em cada nó, com a exceção do nó do topo, de número 40, onde foi considerada uma massa de 104000 kg por causa das massas do rotor e das pás. As pás estão sujeitas a diferentes pressões de vento ao longo do eixo z e, por causa disso, as cargas relacionadas à área de obstrução ao vento do rotor e das pás são consideradas com uma excentricidade de 11 m acima H .

4.2 O Problema de otimização

O problema consiste em minimizar a massa da estrutura. O modelo estrutural considerou uma estrutura cantilever engastada no nível do solo com o diâmetro e a espessura variando ao longo da altura. A estrutura foi considerada tronco-cônica, com as seguintes características:

- conicidade t constante (variação do diâmetro em função do comprimento);
- espessura varia uniformemente com a altura.

O vetor das variáveis de projeto é definido como $\mathbf{b}^t = [\varnothing_t, t, e_t, e_b]$, onde \varnothing_t é o diâmetro do topo, t é a conicidade, e_t é a espessura no topo e e_b a espessura na base. O diâmetro externo \varnothing_i em uma dada seção no nível z_i é calculada como

$$\varnothing_i = \varnothing_t + (H - z_i)t. \quad (13)$$

A espessura no nível z_i é calculada como

$$e_i = e_t + (H - z_i) \frac{(e_b - e_t)}{H}. \quad (14)$$

O problema de otimização é aquele que minimiza a função objetivo:

$$f(\mathbf{b}) = M_s \quad (15)$$

onde M_s é a massa total de aço que compõe a estrutura metálica da torre. As restrições de projeto são:

- a resistência à flexão-compressão da seção transversal em cada nó i

$$\frac{M_{di}}{M_{ui}} + \frac{N_{di}}{N_{ui}} - 1 \leq 0; i=0, \dots, 40 \quad (16)$$

- a resistência da secção à força cortante em cada nó i

$$Q_{di} - Q_{ui} \leq 0; i=0,\dots,40 \quad (17)$$

- a espessura mínima em cada nó i

$$-e_i + 6.3 \text{ mm} \leq 0; i=0,\dots,40 \quad (18)$$

- a compatibilidade entre espessura e diâmetro em cada nó i

$$2e_i - \phi_i \leq 0; i=0,\dots,40 \quad (19)$$

- os diâmetros máximo e mínimo do topo da estrutura

$$\phi_{min} \leq \phi_{40} \leq \phi_{max} \quad (20)$$

- considerar que todas as variáveis de projeto sejam positivas

$$-b_i \leq 0; i=0,\dots,3 \quad (21)$$

- a primeira frequência de vibração deve ser maior que um mínimo

$$-f_1 + 0.624\text{Hz} \leq 0; \quad (22)$$

- o deslocamento máximo do topo da estrutura

$$u_{40} - H/150 \leq 0; \quad (23)$$

- a rotação máxima do topo da estrutura

$$\dot{u}_{41} - 5^\circ \leq 0; \quad (24)$$

Nas Equações (16) a (24) tem-se: M_d é o momento fletor de projeto, calculado como $\gamma_f M_k$, onde γ_f é o coeficiente de majoração dos esforços característicos; M_u é o momento fletor resistente da seção, calculado levando-se em conta a resistência do aço minorada (f_{yd}) e a flambagem localizada da parede da seção transversal (Nicholson, 2011); N_d é força axial de projeto, calculada como $\gamma_f N_k$, onde N_k é a força axial característica; N_u é a força axial resistente da seção, calculada levando-se em conta a resistência do aço minorada (f_{yd}) e a flambagem localizada; Q_d é a força cortante de projeto, calculada como $\gamma_f Q_k$, onde Q_k é a força cortante característica; Q_u é a força cortante resistente da seção, calculada levando-se em conta a resistência do aço minorada (f_{yd}). O valor adotado para γ_f é 1.4. Os valores máximos e mínimos para o diâmetro do topo da estrutura são respectivamente 100 e 200 cm. A Equação (22) é uma das mais importantes restrições e representa o limite inferior da frequência fundamental da estrutura. O limite inferior para f_1 deve ser definido em função do espectro da velocidade de operação do rotor. Com essas definições, o problema de otimização proposto nas Equações (15) a (24) apresenta 4 variáveis de projeto, 173 restrições e 240 graus de liberdade.

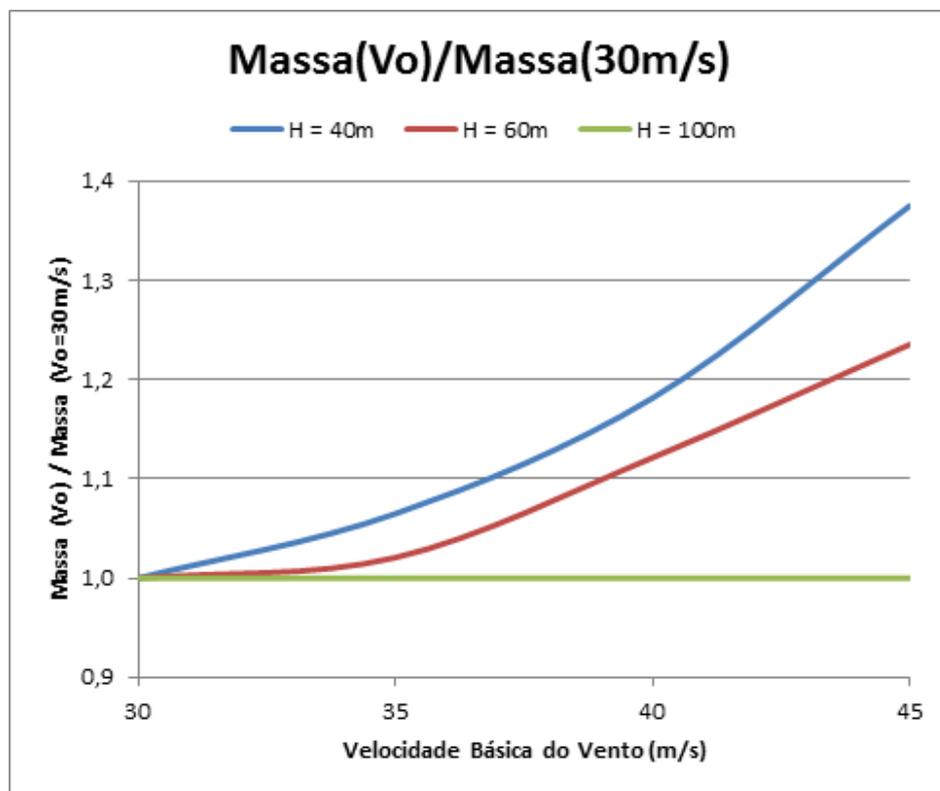


Figura 4 – Massa obtida para as estruturas em função da altura e da velocidade do vento.

4.3 Resultados Obtidos

Os autores organizaram os resultados obtidos na Figura 4. Nessa figura, nas abscissas está a velocidade básica do vento, enquanto nas ordenadas está a razão entre massa ótima obtida para uma determinada velocidade básica do vento e aquela obtida para ventos com velocidades de 30 m/s. O gráfico mostra os resultados para torres com as alturas de 40, 60 e 100 m acima do solo. Observou-se que a torre de 40 m varia (aumenta) sua massa ótima à

medida que se aumenta a velocidade do vento. O mesmo ocorre, com menos intensidade, com a torre de 60 m. Nestes casos o problema é regido pelas restrições de tensão. Já para a torre de 100 m a restrição onde se impõe que a primeira frequência natural de vibração seja superior a 0,62 Hz passa a governar o problema e não se consegue, pelo menos na formulação adotada, reduzir a massa ótima para velocidades de vento menores. Ou seja, neste caso o principal objetivo do projeto é que a torre apresente uma frequência acima do mínimo estabelecido.

5 CONCLUSÕES

Um modelo dinâmico simplificado para análise estrutural de estruturas esbeltas foi apresentado. Esse modelo foi usado para formular um problema de otimização para minimizar o custo de torres eólicas em aço. Torres de diferentes alturas e para diferentes velocidades básica de vento foram otimizadas. As variáveis de projeto consideradas foram o diâmetro do topo, a conicidade, e as espessuras no topo e na base. Restrições foram impostas sobre os esforços internos, deslocamentos e rotações da seção transversal, a frequência fundamental da estrutura, bem como sobre os limites geométricos das seções transversais da estrutura. A conclusão principal desse trabalho é que para torres com alturas abaixo de 100 metros as restrições de tensão são preponderantes no projeto e para aquelas com alturas acima de 100 metros, a restrição de frequência mínima passa a dominar o problema. Neste caso não há variação da massa ótima em função da velocidade básica do vento. Sugere-se para a continuação dos trabalhos o projeto ótimo integrado de estrutura e fundação, bem como a realização de uma otimização de forma da estrutura.

6 REFERÊNCIAS

- Arora, J. S., (2012), *Introduction to Optimum Design*, Third Edition, Academic Press.
- Arora, J. S., (1999), *Optimization of Structures Subjected to Dynamic Loads*, *Structural Dynamic Systems, Computational Techniques and Optimization; Optimization Techniques*, Gordon and Breach Science Publishers, pp. 1-72.
- Brasil, R.M.L.R.F., Silva, M.A., (2006), RC large displacements: optimization applied to experimental results. *Computer and Structures* 84, 1164-1171.
- Brasil, R.M.L.R.F., Silva, M.A., (2015), *Introdução à Dinâmica das Estruturas para a Engenharia Civil*, Segunda Edição, Editora Edgard Blücher, São Paulo.
- Chahande, A. I. e Arora, J. S., (1994), Optimization of large structures subjected to dynamic loads with the multiplier method, *International Journal For Numerical Methods in Engineering*, 37, pp. 413-430.
- NBR-6123, (1988), *Forças devidas ao vento em edificações*, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- NBR-8800, (2008), *Projeto de estrutura de aço e de estrutura mista de aço e concreto de edifícios*, Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- Nicholson, J. C., (2011), Design of wind turbine tower and foundation systems: optimization approach, Master Dissertation, University of Iowa.
- Pfeil, W., Pfeil, M., (2000), Estruturas de aço – Dimensionamento prático (7^a. Edição), LTC Editora.
- Silva, M.A., Brasil, R.M.L.R.F., (2006), Nonlinear dynamic analysis based on experimental data of RC telecommunication towers subjected to wind loading, Mathematical Problems in Engineering, Article ID 46815.
- Silva, M.A., Arora, J., Brasil, R.M.L.R.F., (2013), Dynamic Analysis of Pre-Cast RC Telecommunication Towers Using a Simplified Model, In: Design and Analysis of Materials and Engineering Structures, Berlin, Ed. Elsevier, v.32, p. 97-116.
- Wind Blatt, (2005), Advances in the Brazilian Market, Enercon Energy for World Issue 01/2005.