

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

TACIANA DIEMINGER ALBRING

**PROJETO DE UMA TORRE PARA COLETA DE PARÂMETROS
METEOROLÓGICOS**

Alegrete

2019

TACIANA DIEMINGER ALBRING

**PROJETO DE UMA TORRE PARA COLETA DE PARÂMETROS
METEOROLÓGICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia.

Coorientador: Prof. Dr. José Wagner Maciel Kaehler.

Alegrete

2019

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

A342p Albring, Taciana Dieminger
PROJETO DE UMA TORRE PARA COLETA DE PARÂMETROS
METEOROLÓGICOS / Taciana Dieminger Albring.
53 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2019.
"Orientação: Vicente Bergamini Puglia".

1. Torre. 2. Avaliação do potencial eólico . 3. Energia
eólica. I. Título.

TACIANA DIEMINGER ALBRING

PROJETO DE UMA TORRE PARA COLETA DE PARÂMETROS
METEOROLÓGICOS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 26, novembro de 2019.

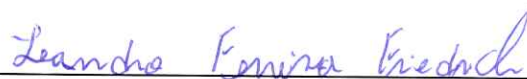
Banca examinadora:



Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia


Orientador

UNIPAMPA



Prof. Me. Leandro Ferreira Friedrich

UNIPAMPA



Prof. Me. Thiago da Silveira

UNIPAMPA

AGRADECIMENTO

Aos meus Pais Gelvane Inês Dieminger Albring e Miguel Antônio Albring, que foram meus alicerces para que pudesse realizar meu sonho, me incentivando e auxiliando sempre, ao meu irmão Thiago Dieminger Albring que esteve sempre ao meu lado durante todos esses anos de graduação.

Ao Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia por aceitar ser meu orientador, pelo sua contribuição, tempo, paciência, confiança e dedicação para a realização deste trabalho.

Aos demais professores por suas contribuições na minha formação profissional e pessoal.

A todos os meus amigos por todo apoio, amizade, companheirismo e ajuda durante a minha formação.

RESUMO

O Brasil dispõe de um grande potencial eólico, por ser uma energia limpa, com poucos danos ambientais, há uma grande demanda. Mesmo o Brasil sendo um país rico em energia hídrica, e possuindo uma extensa rede de distribuição de energia, muitas localidades distantes de centrais ou mesmo de cidades, não dispõem da mesma, ou a distribuição é ineficiente, trazendo assim prejuízos para o consumidor, tanto em seu ambiente domiciliar quanto no seu ambiente de trabalho, inclusive em áreas rurais, onde a produção de laticínios, suinocultura, agricultura em geral, aviários, entre outros, sofrem grandes consequências com a falta de energia elétrica. Em busca de melhorar esse problema, procura-se a implantar turbinas eólicas em sistemas autônomos para a geração de energia própria. Além de produzir energia para seu consumo o consumidor poderá vender o excedente para a concessionária, abrangendo a fonte de renda do mesmo. Para a obtenção da energia, se faz necessário a avaliação do potencial eólico no local, onde se procura condições específicas e favoráveis para melhor geração possível. A avaliação do potencial eólico faz com base na coleta de dados sobre a velocidade e regime dos ventos, onde se instala uma torre para fazer a coleta desses dados. O propósito deste presente trabalho é projetar uma torre volante de baixo porte, onde possa se fazer a coleta de dados necessários para a implementação futura de turbina eólica, procura-se o uso de torre por ser uma estrutura de baixo peso próprio e elevada esbeltez, conjuntamente sendo de fácil construção e instalação.

Palavras-Chave: Torre, avaliação do potencial eólico, energia eólica.

ABSTRACT

Brazil has great wind potential, as it is a clean energy with little environmental damage, there is a great demand. Even though Brazil is a country rich in hydropower, and has an extensive power distribution network, many locations far from central or even cities do not have it, or distribution is inefficient, thus causing harm to consumers, both their home environment in relation to their work environment, including in agricultural areas, where dairy production, pig farming, agriculture in general, poultry, among others, affect major consequences with lack of electricity. In an effort to improve this problem, look for implantable wind turbines and systems in self-contained power generation systems. In addition to producing energy for its consumption or consumer, it may sell or exceed a utility, including a source of income from it. To use energy, make an assessment of on-site wind potential, if there are specific and favorable conditions for the best possible generation. An assessment of wind potential creates based on data collection on wind speed and regime, where a tower is installed to collect this data. The objective of this work is to design a low load tower, where it is possible to collect the data necessary for a future wind turbine implementation, to look for the use of a tower with its own low performance and high performance structure. Together being easy to build and install.

Keywords: Tower, evaluation of wind potential, wind energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz de energia elétrica 2019.....	17
Figura 2 - Altura gradiente e camada limite atmosférica.	19
Figura 3 - Ciclone extratropical formado no hemisfério sul.	20
Figura 4 - Estágio de uma tormenta TS.	21
Figura 5 - Estágio inicial de contato com o solo.	22
Figura 6 - a) Esquema de um escoamento descendente e b) Perfil de velocidade de uma TS.....	22
Figura 7 - Torre em treliça a) Torre autoportante e b) Torre estaiada.	25
Figura 8 - Torre tipo poste.....	26
Figura 9 - Tipos de ligação: a) Slip joint e b) Flanges.	26
Figura 10 - Sistema massa-mola-amortecedor.	27
Figura 11 - Descrição do módulo de 2,7 metros.....	35
Figura 12 - Força aplicada, deformação e deslocamento obtidos do módulo da estrutura de forma equilátera.	36
Figura 13 - Formas analisadas para os cálculos da rigidez.	37
Figura 14 - Mapa de isopleias.	38
Figura 15 - Velocidade característica do vento em função da altura.....	39
Figura 16 - Força do vento em função da altura.....	39
Figura 17 - Pressão Dinâmica em função da altura da estrutura.	40
Figura 18 - Descreve a área de sombra da seção.	41
Figura 19 - Carregamento estático aplicado na estrutura.	41
Figura 20 - Relação entre a altura da torre e o ponto de ancoragem.....	42
Figura 21 - Aplicação dos estais na estrutura.	42
Figura 22 - Modelos de torre completa usando elementos de cabos para a representação dos estais com suas respectivas condições de contorno.	44

Figura 23 - Modos de vibrações das estruturas com elementos de cabos e molas para representação dos estais e suas frequências.	45
Figura 24 - Resposta da análise harmônica.	46
Figura 25 – Esquema dos pontos de reações na base da estrutura.	46
Figura 26 - Tensões na estrutura com elementos de cabos e molas como representação dos estais.	48
Figura 27 - Deformação resultante da estrutura a) dos elementos de mola e em b) dos elementos de cabos, em unidades em SI.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros intrínsecos teóricos da geometria e do material da proposta.	34
Tabela 2 - Mostra a forma de estruturas analisadas com seus respectivos deslocamentos e rigidez.....	36
Tabela 3 - Rigidez das molas em relação aos cabos.	43
Tabela 4 - Reações na base da estrutura com elementos de mola.	46
Tabela 5 - Reações da base da estrutura com elementos de cabos.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

F_c: Força de Coriolis
F_i: Força centrífuga
m: Massa
v: Velocidade
 ω : Velocidade angular
 φ : Ângulo
r': Radial;
V: Velocidade do vento,
A: Área
 ρ : Massa específica
 \bar{V} : Velocidade média
z: Altura
F: Forças
d: Distância
A_e: Área de obstrução do elemento,
C_a: Coeficiente de arrasto
q: Pressão dinâmica
t: Tempo
E: Módulo de elasticidade
G: Módulo de elasticidade
k: Rigidez
c: Amortecimento
a: Aceleração
x(t): é o deslocamento
 $\dot{x}(t)$: Velocidade
 $\ddot{x}(t)$: Aceleração
M: Matriz de massa
K: Matriz de rigidez elástica
D: Matriz Dinâmica
 Φ : Matriz Modal
a₀, b₁: Coeficientes constantes
 τ : Período

\vec{Y} : Vetor de deslocamento

C: Amortecimento de Rayleigh

$[M_r]$, $[C_r]$ e $[K_r]$: Matrizes diagonais

V_0 : Velocidade básica do vento

S_1 : Fator topografico

S_2 : Fator de rugosidade do terreno e dimensões da edificação

F_r : fator rajada

b e p: Parâmetros meteorológicos

V_k : Velocidade característica

S_3 : Fator estatístico

R_e : Número de Reynolds

ϕ : Diâmetro da cordoalha

Cepel: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

GW: Giga Watts

TWh: Terawatt – hora

ANEEL: Agência Nacional de

Energia Elétrica

EPS: Exended Pressure System

TS: Thunderstorm

NBR: Normas Brasileiras

GDL: Grau de Liberdade

det: Determinante

ASTM: American Society for Testing and Materials

RS: Rio Grande do Sul

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CIMAF: Companhia Industrial e Mercantil de Artefatos de Ferro

SI: Sistema Internacional de Unidades

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	ENERGIA EÓLICA	16
2.2	FORMAÇÃO DOS VENTOS	17
2.3	TIPOS DE VENTOS E SUAS CARACTERÍSTICAS	19
2.4	FLUTUAÇÕES E VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO	23
2.5	MEDIÇÃO DO VENTO	23
2.6	TIPOS DE TORRES	24
2.7	FORMAS DE CARREGAMENTO	26
2.8	MODELAGEM MATEMÁTICA	27
2.8.1	ANÁLISE MODAL	28
2.8.2	ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E DO TEMPO	30
2.8.3	MÉTODO DE SUPERPOSIÇÃO MODAL	31
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
4	METODOLOGIA.....	33
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA PROPOSTA.....	34
4.2	RIGIDEZ DA ESTRUTURA.....	35
4.3	DETERMINAÇÃO DAS AÇÕES DEVIDAS AO VENTO.....	37
4.3.1	CÁLCULO DA VELOCIDADE CARACTERÍSTICA DO VENTO	37
4.3.2	DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS DEVIDO AO VENTO.....	40
4.4	MODELAGENS DOS ESTAIS	41
4.5	DESCRIÇÃO DOS MODELOS NUMÉRICOS.....	43
5	RESULTADOS	44

5.1	ANÁLISE MODAL DA ESTRUTURA.....	44
5.2	ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA E DO TEMPO.....	45
5.3	REAÇÕES NA BASE DA ESTRUTURA.....	46
5.4	TENSÕES.....	47
5.5	DEFORMAÇÃO DA ESTRUTURA.....	48
6	CONCLUSÕES	49
6.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	50

1 INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica por meio de turbinas eólicas constitui uma alternativa para diversos níveis de demanda. As pequenas centrais podem suprir localidades distantes da rede ou a ineficiência da mesma. Quanto às centrais de grande porte, estas têm potencial para atender uma significativa parcela do Sistema Interligado Nacional.

Uma das vantagens é operar nos parques eólicos em sistema complementar com as usinas hidrelétricas, já que em períodos de estiagem, a velocidade do vento costuma ser maior. Além do mais, a possibilidade de harmonização do uso do solo com outros usos, como a agricultura e pecuária, permitindo a coexistência dessa nova atividade com atividades tradicionais, (TOLMASQUIM *et al.*, 2016).

A qualidade das medições eólicas, principalmente da velocidade do vento, é o fator principal para a concepção de um parque eólico ou de um sistema autônomo. O estudo do comportamento do vento é extremamente importante. Primeiro passo é fazer a medição correta, pois um simples erro de 10% nas medições de velocidade ocasionará uma diferença de 33% na energia gerada. A melhor alternativa para evitar esses erros é ir ao local onde se pretende instalar uma ou mais turbinas eólicas e fazer as medições corretamente. (PINTO, 2013).

O uso de torres para coletar esses dados, caracteriza-se por ser uma estrutura de baixo peso próprio e elevada esbeltez, é um sistema no qual os esforços axiais são preponderantes. Essas características tornam a torre suscetível à ação do vento, o qual vem a ser o fator determinante para o projeto. Onde essas estruturas devem ser projetadas para resistirem a essa ação, o comportamento dessas estruturas é geralmente avaliado segundo análises estáticas enquanto que a carga do vento possui caráter essencialmente dinâmico aleatório.

A torre a ser projetada neste presente trabalho será utilizada como suporte de equipamentos para a coleta de informações. As características particulares mencionadas fazem com que esse tipo de estrutura seja crítico do ponto de vista técnico, já que não só o colapso total ou parcial, mas também a vibração excessiva podem comprometer a qualidade, confiabilidade das transmissões e diminuir a vida útil de outros componentes que trabalham relacionados à torre.

1.1 Objetivo Geral

Com base na necessidade de prospecção e quantificação do potencial eólico do local, constata-se a indispensabilidade de projetar uma torre para coletar dados de velocidade de ventos e outros parâmetros meteorológicos da região de interesse, onde a estrutura será desenvolvida com o auxílio de software de elementos finitos.

1.2 Objetivos Específicos

Para a concepção do projeto da torre, é indispensável determinar os esforços da torre e de sua base, obter a análise da resposta dinâmica, sob os diferentes aspectos, modelar a estrutura com o auxílio de métodos numéricos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Energia Eólica

O Brasil tem uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo como mostra a Figura (1). As fontes renováveis correspondem a aproximadamente 80% da produção, com predominância na fonte hídrica e menos de 10% é de fonte eólica.

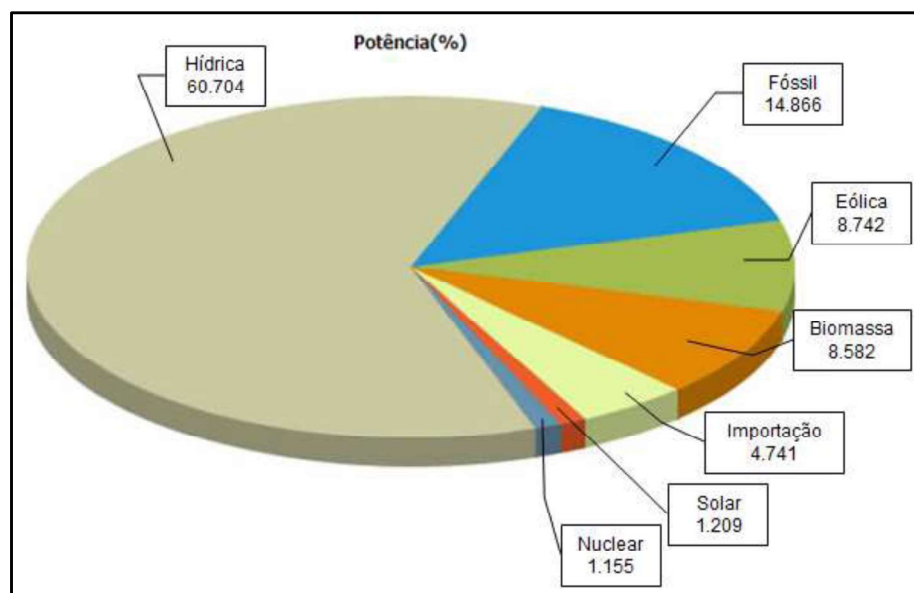
Em 2001 foi publicado o *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*, elaborado pelo Cepel- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, no qual indica um potencial estimado de 143,47 GW, permitindo uma geração anual de 272,220 TWh/ano de ventos de velocidade média anual a partir de 7,0 m/s, considerando uma área equivalente a 0,8% do território nacional. O atlas mostra o potencial do vento nas cinco regiões do país e as áreas mais propícias para a geração de eletricidade a partir do vento. A distribuição dos ventos no Brasil é controlada pelos sistemas de alta pressão anticiclones subtropical do Atlântico Sul e do Atlântico Norte e a faixa de baixas pressões da depressão equatorial. De acordo com o referido atlas as melhores regiões para a geração de energia eólica estão localizadas no litoral do Rio Grande do Norte, Ceará, Rio Grande do Sul e Santa Catarina, (PINTO, 2013).

As turbinas eólicas são equipamentos que absorvem parte da energia cinética de translação das massas de ar (vento), convertendo-a em energia cinética de rotação, que é convertida em energia elétrica através de gerador elétrico acoplado. Com a tecnologia avançando, quando as primeiras turbinas eólicas comerciais foram desenvolvidas em 1980, passaram por grandes melhorias, desde suas características de eficiência e capacidade instalada, até seu design, (PINTO, 2013).

No futuro há uma tendência de um maior desenvolvimento dos sistemas de geração de energia autônomos. Sistemas autônomos ou sistemas de potência isolados são definidos por serem de pequenos ou de médio porte, em que não possuem conexão aos sistemas centrais. Esses sistemas de pequeno porte podem ser instalados em localidades onde não possui energia elétrica, ou mesmo onde há uma deficiência na distribuição pelas concessionárias, incluindo a demora em consertos de danos ocasionados pelo clima.

Na atualidade a matriz de energia elétrica é bem diversificada, com maior predomínio em energias com baixa emissão de carbono.

Figura 1 - Matriz de energia elétrica 2019.



Fonte: Imagem adaptado de ANEEL

2.2 Formação dos ventos

O vento é definido como movimento do ar sobre a superfície terrestre e tem como fator principal a diferença na pressão atmosférica, originada pela energia proveniente do sol que resulta em variações na temperatura do ar. As variações de pressões ocasionam forças que deslocam parcelas do ar atmosférico das zonas de maior pressão para as de menor pressão, (BLESSMANN, 1995).

Movimento de massas de ar ocasionados das diferenças de pressões é afetado pela rotação da Terra, que provoca dois efeitos, primeiro efeito relacionado com a aceleração centrífuga e o segundo relacionado com a aceleração de Coriolis, (PUGLIA, 2009).

O efeito ocasionado pela aceleração centrípeta pode ser desprezado pelo fato do mesmo se manifestar mesmo se as massas de ar estiverem sem movimento.

Considerando que o vento é uma corrente contínua de parcelas de ar, há cinco forças que atuam sobre o vento:

- a) Força do gradiente de pressão;
- b) Força de Coriolis;
- c) Força centrífuga;
- d) Força de atrito;

Segundo PINTO (2013), a geração da força do gradiente de pressão se dá quando existe uma mudança de pressão do ar de uma região para outra. O ar tende a deslocar-se das áreas de pressão mais alta para as de pressão mais baixa. Como o aquecimento desigual da superfície terrestre produz essas diferenças de pressões, a radiação solar é a força que produz o vento.

Para BLESSMANN (1995), efeito relacionado com a aceleração de Coriolis se manifesta sempre que houver uma massa de ar em movimento em relação ao movimento da Terra. A força que age perpendicularmente à direção do movimento das partículas de ar em estudo é denominada de força de Coriolis (F_c), essa força causa um desvio no movimento das partículas de ar, para um observador situado na Terra. Essa força é descrita pela equação (1).

$$F_c = 2m\omega v' \sin\varphi \quad (1)$$

Temos também a influência das forças de inércia acarretadas pelas trajetórias curvas das partículas de ar, ou seja, força centrífuga (F_i) descrita pela equação (2).

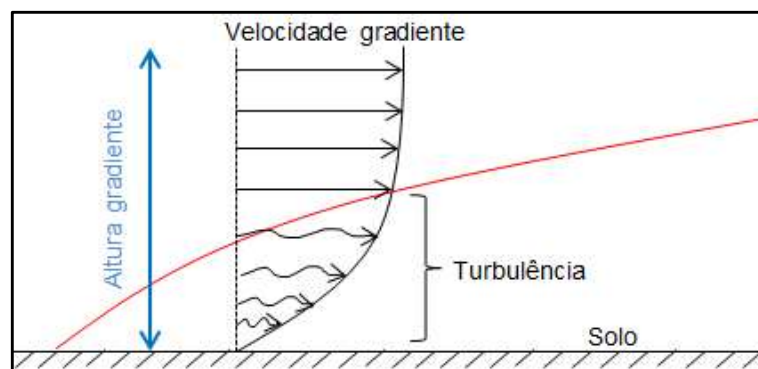
$$F_i = m\omega^2 r' \quad (2)$$

Onde: m : massa da partícula de ar; v : velocidade desta partícula para um sistema de referência fixa a Terra; ω : velocidade angular da Terra; φ : ângulo entre os vetores $\vec{\omega}$ e \vec{v}' ; r' : representa a direção de atuação dela, ou seja, radial;

A relação da força de Coriolis com o vento é que a mesma faz o vento apresentar movimentos circulares ou em espiral, em torno dos centros de pressões, ocasionando deslocamento de massas de ar entre os polos e o equador, (PINTO, 2013).

A altura gradiente Figura (2), é a altura, medida a partir da superfície da Terra, onde a velocidade do vento atinge a velocidade gradiente. Abaixo da altura gradiente encontra-se a camada limite atmosférica, na qual a velocidade do vento é modificada por diversas causas, principalmente pela rugosidade superficial e pela variação da temperatura na direção vertical. Todos esses fatores originam turbulência, que rapidamente se dissemina por toda camada limite atmosférica. Nesta, a velocidade média do vento varia desde zero, junto à superfície, até a velocidade gradiente, na altura gradiente. Quanto maior a rugosidade superficial, tanto maior será a agitação mecânica provocada no ar, maior o intercâmbio turbulento de quantidade de movimento e maior a altura interessada nesse processo. A altura gradiente é maior em uma cidade do que em campo aberto, por exemplo, (BLESSMANN, 1995).

Figura 2 - Altura gradiente e camada limite atmosférica.



Fonte: Elaboração do autor

2.3 Tipos de ventos e suas características

Segundo PUGLIA (2009), podem ser encontrados dois tipos de tormentas que geram duas classes de ventos fortes bem caracterizados: tormentas extratropicais ou tormentas EPS (*Extended Pressure System*) e tormentas elétricas (TS - *Thunderstorm*). A seguir serão descritos com detalhes os ventos que cada uma delas produz.

-Tormenta EPS – *Extended Pressure System*: São conhecidos também como tormentas extratropicais, se caracterizam por movimentos circulatórios do ar em torno de centros de baixa pressão, que podem ser originados pela ação mecânica de cadeias de montanhas sobre correntes atmosféricas de grandes dimensões ou pela interação de massa de ar ao longo de frentes. São caracterizadas por uma atmosfera verticalmente estável, com uma velocidade média razoavelmente

constante ao longo da duração do evento, a tormenta pode variar de horas até dias, a mesma atinge grandes dimensões. Na Figura (3) é mostrado um ciclone extratropical no hemisfério sul e na Figura (2) descrita acima é mostrado também o perfil de velocidade de uma tormenta EPS.

Figura 3 - Ciclone extratropical formado no hemisfério sul.



Fonte: Imagem extraída de PUGLIA, (2009).

Ciclones tropicais possuem características semelhantes aos ciclones extratropicais, no entanto são mais intensos e mais localizados. São formados a partir do ar úmido e quente existente sobre grandes extensões de água com temperatura superior a 27°C. Eles se originam em latitudes entre 5° e 30° do globo terrestre, nestas latitudes a força de Coriolis é mais significativa, (BLESSMANN, 1995). O movimento do ar quente e úmido é levado para o centro da circulação forçando a ascensão do ar, este se expande, esfria e com isso uma grande quantidade de vapor de água contido na massa de ar é condensado. Para que ocorra o fenômeno são necessárias três condições, (PUGLIA, 2009).

- Água do mar precisa estar quente com temperatura da superfície em 27°C;
- O ar a baixas alturas deve convergir para o interior da área do ciclone;
- O fluxo de ar a grandes alturas precisa estar em expansão para que a circulação de ar seja sustentável.

-Tormentas Elétricas – *Thunderstorm* (Tormentas TS): São conhecidas também pelo nome de trovoadas ou tormentas TS. A característica principal é uma atmosfera verticalmente instável, o gradiente térmico vertical provoca movimento vertical de ar com formação de nuvens a grandes alturas. A força ascensional que movimentada verticalmente o ar pode ter sua origem no aquecimento da superfície terrestre, em uma frente fria, na diferença de temperatura entre terra e mar ou no movimento do ar subindo a encosta de montanhas.

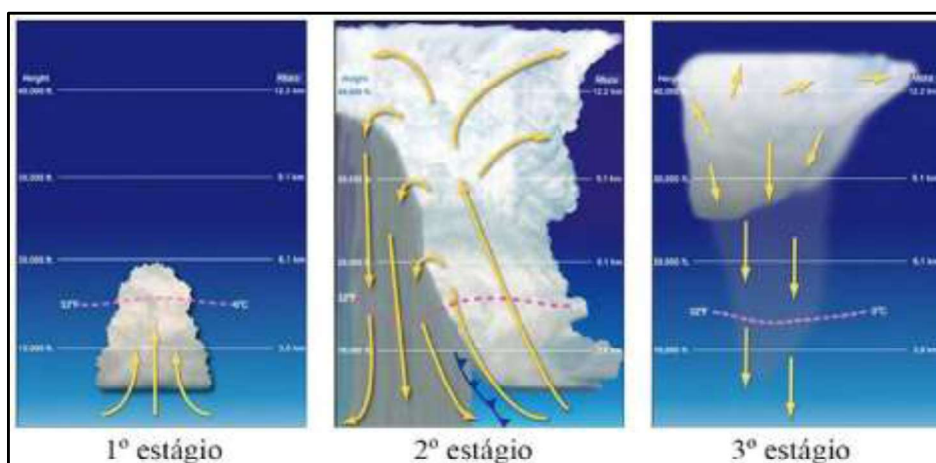
Esse tipo de tempestade é chamado tempestade elétrica, pois a fricção da chuva e do gelo com o ar origina diferença de potencial elétrico em diferentes partes da nuvem, ou entre nuvens, e solo, resultando em descargas elétricas.

O desenvolvimento de uma tempestade elétrica inicia-se com a formação de nuvens *cumulus*, elevação do ar quente e úmido até uma altura de cerca de 8km, sendo a temperatura do ar circundante menor que a do ar ascendente, em uma altura de 12km as nuvens transformam-se em *cumulusnimbus*, iniciando-se a formação de gotas de água, cristais de gelo e neve, devido à alta altitude e consequente baixa temperatura, início de precipitação devido ao desequilíbrio entre os elementos gotas, cristais de gelo com as correntes ascendentes.

Em seguida a intensidade de precipitação aumenta devido ao resfriamento do ar em função da queda dos elementos acima mencionados. Essas correntes descendentes são bruscas e acompanhadas de chuva torrencial.

As correntes descendentes aumentam em área transversal e passam a fazer parte de toda nuvem. Não havendo mais ar quente e úmido a precipitação acaba. Na Figura (4) é mostrado um esquema dos estágios de uma tempestade do tipo TS.

Figura 4 - Estágio de uma tempestade TS.



Fonte: Imagem extraída de NUNES, (2018).

1º estágio: Elevação do ar quente e úmido até a altura de 8 Km, formando a nuvem *Cumulus*.

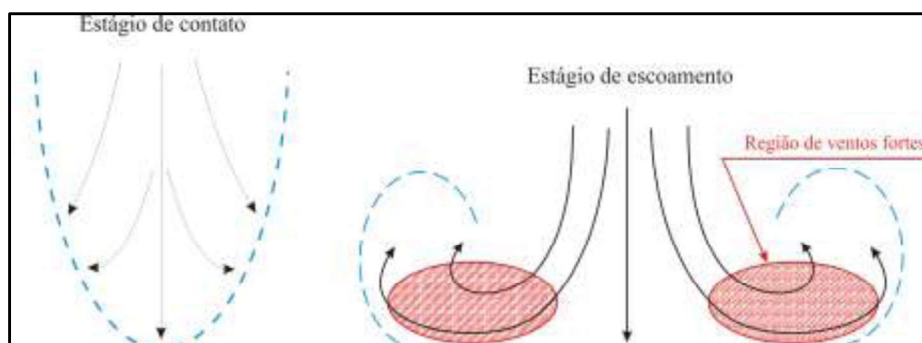
2º estágio: A nuvem *Cumulus* se transforma em *Cumulusnimbus*, com a formação de gelo e neve, devido às baixas temperaturas. Ocorre o início da

precipitação devido ao desequilíbrio entre a neve/gelo com as correntes ascendentes. Então se formam fortes correntes descendentes.

3º estágio: As correntes descendentes aumentam em área transversal. Não havendo mais ar quente e úmido a precipitação acaba.

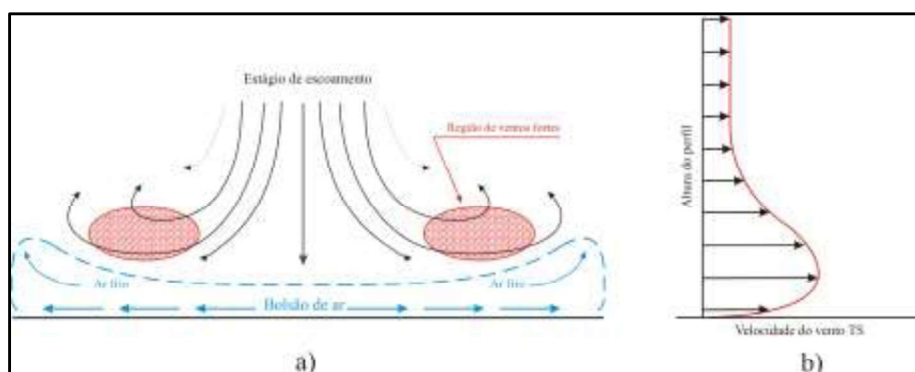
A expressão escoamento descendente é utilizada para designar as expressões *downburst* e *downdraft*. Este escoamento consiste num rápido jato de ar que desce verticalmente. Quando este escoamento atinge o solo o jato se converte em um fluxo horizontal denominado *wind share* ou tesouras de vento. As tesouras de vento implicam mudanças rápidas de direção nas velocidades de vento podendo ser um fator de risco em pousos e decolagens de aeronaves e para estabilidade estrutural, principalmente em linhas e torres de transmissão. As Figuras (5) e Figuras (6) (a) e (b) mostram respectivamente os estágios iniciais e finais de contato de um escoamento descendente assim como o perfil de velocidade de uma tormenta TS, (JUNIOR, 2005).

Figura 5 - Estágio inicial de contato com o solo.



Fonte: Imagem extraída de PUGLIA, (2009).

Figura 6 - a) Esquema de um escoamento descendente e b) Perfil de velocidade de uma TS.



Fonte: Imagem extraída de PUGLIA, (2009).

2.4 Flutuações e velocidade Média do vento

Para PUGLIA (2009), a velocidade média é influenciada pela rugosidade do terreno. A mesma exibe um perfil que vai da velocidade gradiente até próximo a zero junto à superfície. Quanto maior a rugosidade do terreno, maior será a agitação do ar e maior será o intercâmbio turbulento, alterando o perfil da velocidade e sua altura gradiente.

As flutuações de velocidade do vento ocorrem em torno de um valor médio, onde são chamadas de rajadas, as mesmas ocorrem em sequência aleatória de intensidade e frequência. As velocidades médias são determinadas para intervalos de 10 minutos e 1 hora. Já as rajadas na prática são determinadas por pequenos intervalos de tempo, da ordem de segundos, por isso os anemômetros não conseguem medir valores realmente instantâneos.

Além da solicitação estática do vento, que depende de sua velocidade média, aparecem também às solicitações dinâmicas, que dependem da energia cinética nas flutuações e de como esta energia se distribui pelas diversas frequências, (PUGLIA 2009).

As flutuações no domínio do tempo, em torno de um valor médio, apontam para uma maneira de considerar um vetor velocidade média $\bar{V}(r)$, onde a velocidade é em função do vetor posição r . O sistema de direções possui 3 eixos coordenados retangulares, onde o eixo 1 (eixo das abcissas x) é orientado na direção e sentido da velocidade média. O vetor flutuação de velocidade ou vetor rajada, pode ser decomposto em três direções, como descrito a seguir:

$$V(r;t)=V_1 (r;t)+V_2 (r;t)+V_3 (r;t) \quad (3)$$

A irregularidade das flutuações conduz a um estudo por meio da teoria de probabilidade e média estatística. Onde a distribuição de probabilidade fornece a frequência relativa de ocorrência das velocidades, afirma-se que a distribuição de Gauss em geral fornece uma boa representação da distribuição de velocidades na turbulência atmosférica.

2.5 Medição do vento

Para PINTO, (2013), a qualidade das medições eólicas, principalmente da velocidade do vento, é o fator principal para a concepção de um parque eólico ou

mesmo de um sistema autônomo. O estudo do comportamento do vento é extremamente importante. Primeiro passo é fazer a medição correta, pois um simples erro de 10% nas medições de velocidade ocasionará uma diferença de 33% na energia gerada. A melhor alternativa para evitar esses erros é ir ao local onde se pretende instalar uma ou mais turbinas eólicas e fazer as medições corretamente.

Para a coleta dos dados utilizam-se torres anemométricas com alturas de 50, 80 e 100 metros, nelas instalam-se dispositivos de medição de coleta de dados, como anemômetros, sensores de direção do vento, de temperatura, umidade e pressão atmosférica. Então com os dados coletados, é possível, por meios estatísticos, obter velocidades médias, mínimas e máximas, os desvios padrões, a intensidade da turbulência e a distribuição de velocidade. A partir dessas informações, tem-se a densidade de potência, ou seja, a energia contida no vento.

Para sistemas autônomos, que independem da rede, não existe regulamentação específica, não havendo necessidade de utilizar torres anemométricas com alturas especificadas anteriormente, ou seja, podendo utilizar torres de menor porte. Entretanto segue-se de forma análoga a obtenção e tratamento dos dados coletados, como citado anteriormente.

Em um levantamento além da importância dos anemômetros devem-se levar uma série de outros fatores que precisam ser levados em consideração. Como a qualidade e a calibração dos anemômetros, o modo de instalação na torre, período gasto na medição, as correlações de longo prazo e a extrapolação da velocidade do vento, todos esses fatores, em conjunto, contribuem para a alta ou baixa incerteza da medição e conseqüentemente para a estimativa da energia gerada.

2.6 Tipos de Torres

ZAMPIRON (2008) divide as torres autoportantes para telecomunicação pelas principais formas de concepção estrutural.

- Torre treliçada: é a forma estrutural mais utilizada, ela apresenta baixa resistência aerodinâmica e economia no uso de materiais. É formada por uma parte tronco-piramidal, junto ao solo, e outra parte reta, na qual são fixados os equipamentos para coleta de dados ou mesmo antenas. Sua seção transversal é comumente triangular ou quadrada. Por apresentar uma maior economia na execução das ligações e ser menos suscetível aos efeitos de corrosão, o perfil cantoneira é mais utilizado, entretanto elementos formados por tubos são também

empregados com frequência. As alturas usuais para este tipo de torre variam entre 30 e 120 metros.

Ao contrário das torres estaiadas, que geralmente apresentam seção transversal constante, as torres autoportantes em treliça Figura (7), usualmente apresentam seção variável ao longo da altura. Esta forma gera uma grande economia na fabricação da torre e na execução das fundações.

Uma vantagem deste tipo de estrutura sobre outros tipos tais como os postes metálicos é o alto valor da componente aerodinâmica do amortecimento, devido à grande distribuição da sua massa.

Em projetos a forma com que as treliças são modeladas pode variar, podendo ser modelada através de elementos de treliça espacial, com a utilização de elementos fictícios com rigidez desconsiderável para aumentar a hiperestaticidade da estrutura ou pode ser modelada diretamente como elementos de pórtico espacial.

Figura 7 - Torre em treliça a) Torre autoportante e b) Torre estaiada.



Fonte: Imagem extraído de <<http://www.torretelecom.com.br/fotos/>>.

- Torre tipo poste: são constituídos por um único elemento vertical que pode ser de concreto armado ou formado por tubos circulares ou poligonais de aço. São geralmente utilizados para alturas entre 20 e 60 metros. As vantagens em relação a torres formadas por treliças é a agilidade e menor área para a instalação, Figura (8).

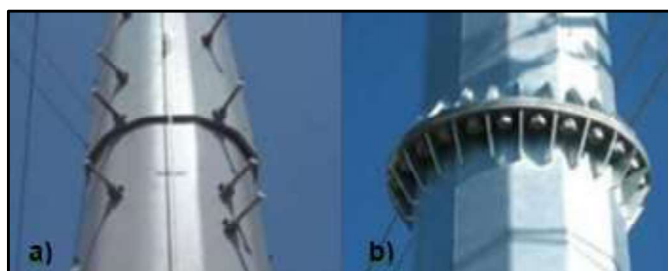
Figura 8 - Torre tipo poste.



Fonte: Imagem extraído de <<https://www.seccional.com.br/catprodutos/telecom/>>.

Este tipo de torre é formado por segmentos de seção variável que usualmente não ultrapassam seis metros de comprimento. A forma de ligação mais comum é por flanges parafusadas, no entanto existem alternativas de união tais como solda e o método “*Slip Joint*” onde este é constituído por um encaixe que promove um transpasse entre os segmentos, resultando em uma estrutura com paredes duplas na região da união, tendo como vantagem, o aumento da rigidez e do amortecimento da região.

Figura 9 - Tipos de ligação: a) Slip joint e b) Flanges.



Fonte: Imagem extraído de <<https://thegolfclub.info/related/slip-joints-on-twin-towers.html>>.

2.7 Formas de Carregamento

A determinação das forças devidas à ação do vento num tempo t é definida para cada nó pertencente a um elemento da estrutura e em função da altura da estrutura. A partir dos registros de velocidade do vento obtidos são determinados os valores da pressão dinâmica (q) definida pela equação (4).

$$q(t,z) = \frac{\rho}{2} (V(t,z))^2 \quad (4)$$

Onde: $V(t,z)$: é o somatório das velocidades definidas pelo registro anemométrico com as componentes flutuantes determinadas de forma teórica; ρ é igual $1,226\text{kg/m}^3$, definido nas condições normais de temperatura e pressão atmosférica, 15C° e 1atm , respectivamente.

As forças devidas ao vento $F(t)$, apresentadas na equação (5), são determinadas em função da pressão dinâmica do vento, área de obstrução ou área de sombra do elemento e pelo coeficiente de arrasto C_a que avalia a influência do formato da estrutura. Neste caso não foi considerado o fator de redução da estrutura para barras de comprimento infinito que leva em conta os efeitos tridimensionais do escoamento, (ZAMPIRON, 2008).

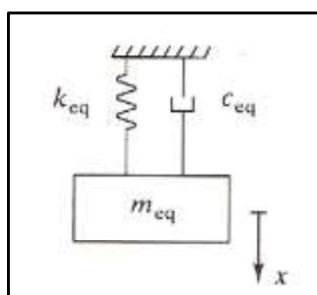
$$F(t) = q(t,z) A_e C_a \quad (5)$$

Onde: A_e : é a área de obstrução do elemento, C_a : é o coeficiente de arrasto para o elemento, $q(t,z)$: é a pressão dinâmica exercida pelo vento.

2.8 Modelagem matemática

Um sistema vibratório é baseado nas características da estrutura como: rigidez (k), massa (m) e amortecimento (c). A forma mais simples de modelar um sistema linear de 1 grau de liberdade (GDL) com amortecimento viscoso é através de um sistema massa-mola-amortecedor, conforme Figura (10).

Figura 10 - Sistema massa-mola-amortecedor.



Fonte: imagem extraída de SILVA, (2009).

Para obter a equação do movimento do sistema, um método indicado é a construção de um diagrama de corpo livre em um instante qualquer, descrevendo todas as forças atuantes em termos de coordenadas generalizadas.

Para um corpo rígido o movimento oscilatório pode ser descrito pela segunda lei do movimento de Newton, conforme a equação (6).

$$\sum F = ma \quad (6)$$

Considerando que a massa sofra a ação de uma força $F(t)$, a equação do movimento para esse sistema é dado por (7).

$$F(t) - kx(t) - c\dot{x}(t) = m\ddot{x}(t) \quad (7)$$

Onde: $x(t)$: é o deslocamento do sistema, $\dot{x}(t)$: é a velocidade, $\ddot{x}(t)$: é a aceleração.

2.8.1 Análise modal

Caracteriza-se como a análise das características modais, onde as frequências naturais e os modos de vibração do sistema são submetidos a excitações.

Segundo SOEIRO, (2001), as frequências naturais e as respectivas formas modais que estão associadas a estas frequências são específicos de cada estrutura. Basicamente, são características que dependem da inercia e da rigidez.

A obtenção destas características pode ser realizada pela equação de equilíbrio dinâmico simplificado e da análise modal de um sistema livre e sem amortecimento. Sendo assim descrito pela equação (8).

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (8)$$

Sendo M a matriz de massa do sistema, considerando que a mesma é diagonal quadrada de dimensões $n \times n$, onde n é o número GDL do sistema, expressada por (9):

$$M = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & m_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & m_n \end{pmatrix} \quad (9)$$

A matriz K também possui dimensões quadrada de $n \times n$, e representa a rigidez elástica do sistema, a mesma é descrita pelo índice K_{ij} determinado ao medir a força resultante i ao se impor um deslocamento unitário j , expressa por (10).

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{1n} & k_{2n} & \dots & k_{nn} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Da mesma forma em sistemas com amortecimento a representação é pela matriz C .

O deslocamento do sistema é descrito como um vetor de dimensão $n \times 1$, representado na equação (11). Realizando a primeira e a segunda derivadas desta

equação, obtém-se a equação (12) da velocidade e (13) da aceleração, respectivamente.

$$\vec{x}(t) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (11)$$

$$\vec{\dot{x}}(t) = \omega \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \text{cos}(\omega t + \phi) \quad (12)$$

$$\vec{\ddot{x}}(t) = -\omega^2 \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (13)$$

Substituindo as equações (12) e (13) na equação do movimento (8), tem-se:

$$-\omega^2 M \vec{\varphi}_n \text{sen}(\omega t + \phi) + K \vec{\varphi}_n \text{sen}(\omega t + \phi) = 0 \quad (14)$$

Dividindo a equação (14) por $\text{sen}(\omega t + \phi)$, visto que é $\neq 0$ para todo o tempo, obtém-se:

$$(-\omega^2 M + K) \vec{\varphi}_n = 0 \quad (15)$$

A fim de obter a solução do sistema:

$$\det[-\omega^2 M + K] = 0 \quad (16)$$

Ao multiplicar a equação (16) de frequências do sistema pela matriz inversa da massa, tem-se:

$$|-\omega^2 I + D| = 0 \quad (17)$$

Onde D é a matriz dinâmica definida como sendo:

$$D = M^{-1} K \quad (18)$$

Assumindo que $\lambda = \omega^2$, a expressão resulta em:

$$|D - \lambda I| = 0 \quad (19)$$

Para cada frequência natural, haverá um φ_i que caracteriza um módulo vibratório. Ao calcular os autovalores (frequências naturais) pela equação (16) de frequências do sistema e os auto vetores (modos de vibrações) da matriz dinâmica D, é possível montar a matriz modal Φ , representada na equação (20):

$$\Phi_{nn} = [\vec{\varphi}_1, \vec{\varphi}_2, \dots, \vec{\varphi}_n] \quad (20)$$

2.8.2 Análise no domínio da frequência e do tempo

A análise no domínio da frequência, conforme o nome sugere, é a determinação da resposta da estrutura no domínio da frequência. Desta forma se obtém a reação permanente de uma estrutura linear sob a ação de uma excitação no domínio do tempo, desprezando as vibrações transientes iniciais.

Quando a estrutura ou sistema linear é submetido a uma excitação periódica ou cíclica, a resposta também será cíclica e com a mesma frequência de excitação. Assim, a resposta da análise no domínio da frequência prediz o comportamento dinâmico de uma estrutura, permitindo a verificação da existência de ressonância numa determinada faixa de frequência de excitação em que a estrutura trabalhe (PUGLIA 2009).

De acordo com RAO (2008), embora o movimento harmônico seja mais simples de ser tratado, nem todos os sistemas vibratórios são desta maneira. Porém, em muitos casos as vibrações são periódicas e as funções periódicas de tempo podem ser representadas por série de Fourier.

Desta maneira, se $x(t)$ é uma função periódica com período τ , sua representação é dada por:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots \quad (21)$$

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (22)$$

Onde: $\omega = 2\pi/\tau$ é a frequência fundamental, $a_0, a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$: são coeficientes constantes.

Para determinar os coeficientes a_n e b_n , multiplica-se a equação (22) por $\cos(n\omega t)$ e $\sin(n\omega t)$, respectivamente e após, integra-se sobre um período de 0 a $\tau = 2\pi/\omega$, assim obtém-se:

$$a_0 = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} x(t) dt = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} x(t) dt \quad (23)$$

$$a_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} x(t) \cos n\omega t dt = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} x(t) \cos (n\omega t) dt \quad (24)$$

$$b_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} x(t) \sin n\omega t dt = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} x(t) \sin (n\omega t) dt \quad (25)$$

Apesar da série da equação (22) ser uma soma infinita, pode-se aproximar a maioria das funções periódicas com ajuda de algumas funções harmônicas,

$a_n \cos(n\omega t)$ ou $b_n \sin(n\omega t)$, onde são denominadas as harmônicas de ordem n da função periódica $x(t)$, na qual possui período τ/n .

2.8.3 Método de Superposição Modal

Este método permite desacoplar equações de movimento lineares acopladas em n equações de um grau de liberdade. É viável resolver estas equações para diferentes formas modais, obtidas através da análise modal da resposta da estrutura, considerando sistemas de um grau de liberdade. O desacoplamento da equação resulta em equacionamentos mais simples, permitindo maior velocidade de resolução, (DACAL, 2017).

O método de superposição modal fundamenta-se na propriedade de as matrizes de massa e de rigidez, serem ortogonais às matrizes, cujas colunas são formadas pelos auto vetores do problema estudado $[\Phi]$. Onde essa propriedade, pode ser facilmente demonstrada a seguir, (PUGLIA, 2009).

$$\begin{aligned} [\Phi]^T [M] [\Phi] &= [M_r] && \text{(Matriz diagonal)} \\ \downarrow & && (26) \\ [\Phi]^T [k] [\Phi] &= [k_r] && \text{(Matriz diagonal)} \end{aligned}$$

Levando em consideração a mudança de base do vetor deslocamento, é possível escrever a equação (27):

$$\vec{x}(t) = [\Phi] [\vec{Y}] \quad (27)$$

Onde: \vec{Y} : é o vetor de deslocamento apresentado em outra base, chamada de coordenadas modais. Assim, a equação do movimento fica:

$$[M] \Phi \ddot{\vec{Y}} + [C] \Phi \dot{\vec{Y}} + [K] \vec{Y} = \vec{f}(t) \quad (28)$$

Multiplicando a equação (28) por Φ^T , tem-se:

$$\Phi^T [M] \Phi \ddot{\vec{Y}} + \Phi^T [C] \Phi \dot{\vec{Y}} + \Phi^T [K] \vec{Y} = \Phi^T \vec{f}(t) \quad (29)$$

Sendo C : o amortecimento de Rayleigh, então se tem a equação (30):

$$[M_r] \ddot{\vec{Y}} + [C_r] \dot{\vec{Y}} + [K_r] \vec{Y} = \Phi^T \vec{f}(t) \quad (30)$$

Onde: $[M_r]$, $[C_r]$ e $[K_r]$ são matrizes diagonais.

Para a maioria dos tipos de cargas e de estruturas prevalece a contribuição dos modos de mais baixas frequências frente aos outros. Isto significa uma vantagem, porque a soma expressa na equação (30) pode ser truncada desde que

já se tenha obtido o grau de precisão desejada. Assim sendo, só será necessária a determinação das frequências em seus modos mais baixos.

Os modelos computacionais devem ter o nível de discretização de acordo com a quantidade de modos incluídos na resposta. Uma vez que uma malha mais refinada é capaz de captar mais altas frequências com menores erros, e devido ao tipo de solicitação, a correta determinação da mesma se torna mais importante.

Assim a aplicação deste método se restringe para casos onde prevaleçam baixas frequências, tornando atrativo computacionalmente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste ponto, são expostos alguns estudos e resultados de trabalhos recentes relacionados ao comportamento estático e dinâmico das torres para telecomunicações, procura-se enfatizar os desenvolvimentos e conclusões obtidas por diversos autores.

MENIN, (2002), estudou o comportamento de torres estaiadas submetidas ao carregamento estático do vento, segundo o procedimento descrito na norma NBR 6123, bem como a resposta na direção do vento empregando o método de simulação do tipo Monte Carlo para o cálculo do carregamento flutuante. Segundo o autor, as formulações lineares e não-lineares, para a análise estática, levaram a resultados muito próximos, não se mostrando necessária a formulação não-linear para o estudo das torres estaiadas. O estudo apresentou também uma análise dinâmica de uma torre estaiada de 10 metros, levando em conta o tempo máximo de 10 segundos, onde foi verificado que o deslocamento de topo da estrutura foi maior do que o da análise estática. Porém, a análise dinâmica resultou em esforços menores que os obtidos na fase estática.

MERCE, (2003), apresentou uma análise dinâmica de torres metálicas autoportantes submetidas à ação do vento, utilizando o método estatístico de Davenport e o método de simulação de Monte Carlo para o cálculo da parcela flutuante do vento. Dos resultados apresentados, verificou-se que o deslocamento de topo das estruturas na análise estática foi superior ao obtido pela análise dinâmica. Adicionalmente, a autora pode constatar que os resultados da análise dinâmica, obtidos através do método de Davenport, aproximaram-se dos valores obtidos da análise com o modelo discreto da norma NBR 6123.

REQUENA *et al* (2005), realizaram uma análise comparativa do dimensionamento de duas torres autoportantes submetidas às ações estática e dinâmica do vento, definidas segundo o procedimento apresentado na norma NBR 6123. Segundo os autores, os resultados mostraram que o cálculo da ação do vento via método dinâmico, utilizando o modelo contínuo simplificado, conduziu a uma estrutura com peso próprio superior ao obtido da análise estática. A partir desta avaliação, notou-se a importância da análise dinâmica para essas estruturas. O método estático, que é uma simplificação do método dinâmico, conduziu a resultados contrários à segurança da estrutura.

SANTOS *et al* (2005), apresentaram uma análise estrutural de uma torre metálica autoportante utilizada no setor de telecomunicações, sob a ação do carregamento turbulento. A análise da torre sob este carregamento foi realizada no domínio do tempo por meio de históricos de velocidades do vento gerados a partir do espectro de potência de Harris. A resposta da estrutura foi comparada em termos do deslocamento de topo com a resposta estática segundo o modelo da norma NBR 6123. Após a comparação dos resultados, os autores constataram que os deslocamentos correspondentes à análise dinâmica foram de 20% superiores àqueles decorrentes das forças estáticas. Indicado, portanto, a relevância de se considerar o caráter dinâmico da ação do vento para esse tipo de estrutura.

RIBEIRO *et al* (2005), realizaram uma análise estática e dinâmica para três torres estaiadas existentes. Os estudos compreenderam uma análise comparativa para três diferentes tipos de modelagem estrutural. Os resultados mostraram, conforme os autores, diferenças significativas no que diz respeito aos valores máximos de tensões e, por outro lado, as deflexões laterais dos modelos foram pouco afetadas pela estratégia de modelagem utilizada. Com relação às frequências naturais, não houve grande influência. Os autores concluíram o estudo recomendando a adoção da modelagem combinada (elementos de viga e de treliça), sendo os membros estruturais principais da torre representados por elementos de viga espacial e todo o sistema de contraventamento modelado a partir de elementos finitos de treliça.

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os parâmetros adotados na realização do projeto, tratamento dos dados analisados, modelagem numérica, calibragem e validação das

propostas. Para a modelagem numérica, utiliza-se software de elementos finitos SAP2000. Primeiramente é necessário determinar os parâmetros de pré-processamento, seguido da determinação das soluções desejadas.

4.1 Caracterização da Proposta

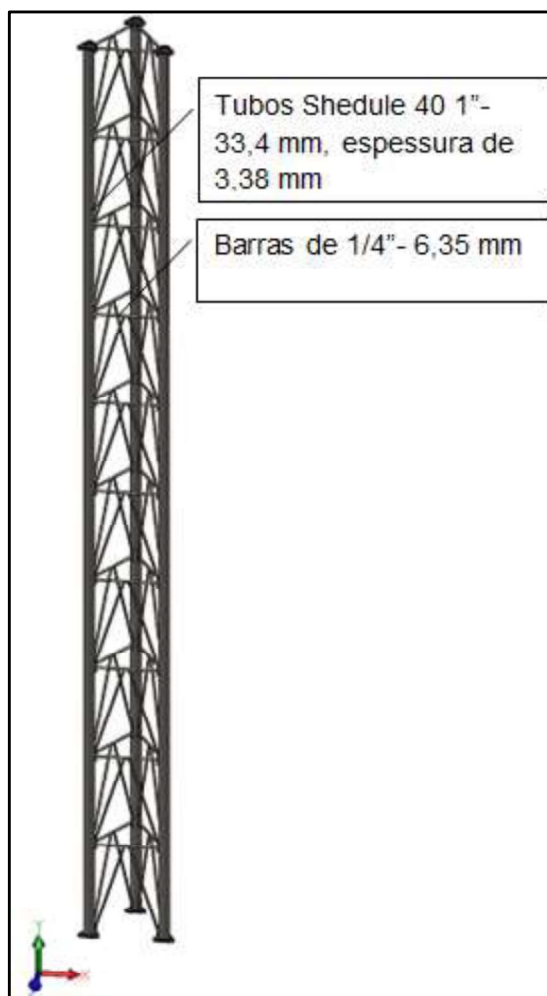
A caracterização da estrutura e das propriedades intrínsecas do material a ser utilizado na proposta inicial, como apresentado na Tabela (1).

Tabela 1 - Parâmetros intrínsecos teóricos da geometria e do material da proposta.

Parâmetros	
Material	Aço ASTM A-36
Densidade (ρ) (kg/m ³)	7850
Módulo de Young (E) (N/m ²)	200 x 10 ⁹
Coefficiente de Poisson	0,3
Altura total da torre (L_{total}) (m)	21,6
Altura de cada módulo (L_m) (m)	2,7
Número de seções (N)	8

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 - Descrição do módulo de 2,7 metros.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizam-se elementos de formas arredondadas na concepção da estrutura, por possuir uma forma mais aerodinâmica e a seção transversal do elemento é simétrica, otimizando assim a distribuição de tensões nos elementos.

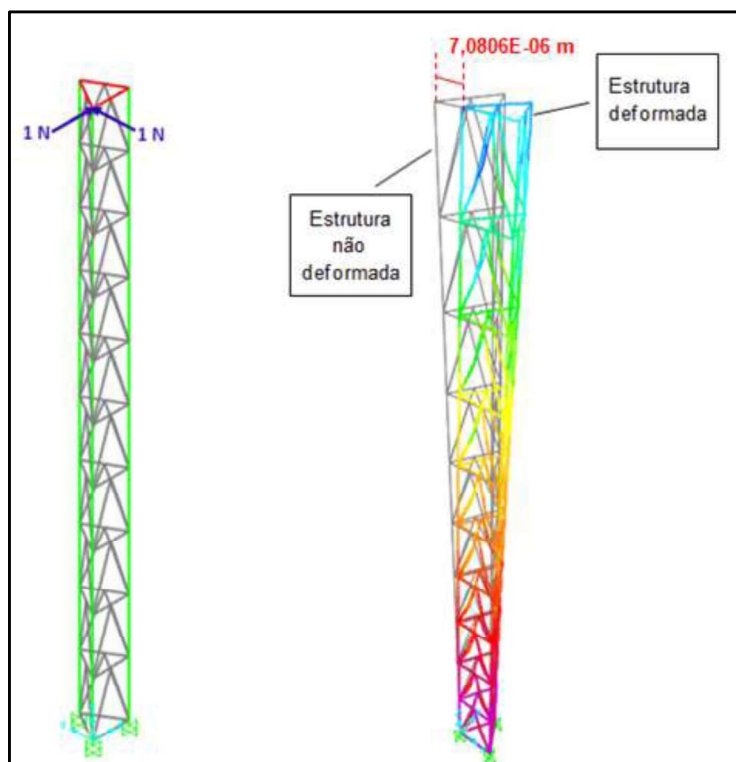
4.2 Rigidez da estrutura

Para alcançar a rigidez considerou-se um conjunto com oito módulos de estrutura real da torre com o propósito de determinar as propriedades da estrutura. O conjunto de oito módulos possuem 2,7 metros de altura cada um, com as propriedades geométricas análogas as existentes em estruturas da torre reais.

Determinou-se a rigidez à flexão, aplicando forças unitárias no topo do módulo, na direção do eixo X e Y (positivos). Para garantir que haja somente esforços de flexão no módulo, restringe-se a base para que não haja deslocamentos e nem rotações em quaisquer direções, os elementos que compõe o topo do módulo

possuem rigidez elevada para que toda a força aplicada seja transferida para os elementos da estrutura. Posteriormente é obtida a resposta da estrutura em termos de deslocamento. A Figura (12) indica detalhadamente a forma utilizada para obter a rigidez.

Figura 12 - Força aplicada, deformação e deslocamento obtidos do módulo da estrutura de forma equilátera.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A rigidez é calculada pela equação (31), considerando análise linear.

$$k = F/d \quad (31)$$

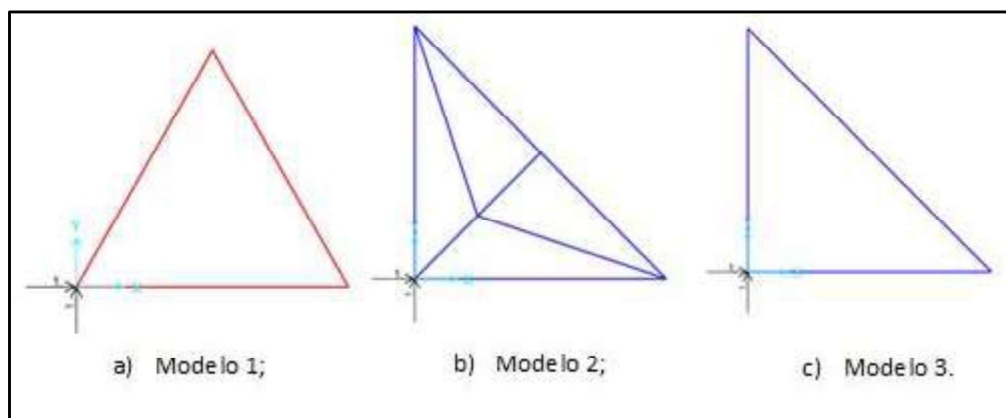
Onde: F é a força aplicada no nó no topo do módulo, d é a distância que o nó desloca após a aplicação da força.

Tabela 2 - Mostra a forma de estruturas analisadas com seus respectivos deslocamentos e rigidez.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Forma	a)	b)	c)
Deslocamento resultante (m)	$7,08 \times 10^{-6}$	$8,30 \times 10^{-6}$	$8,13 \times 10^{-6}$
Rigidez k (N/m)	$1,99 \times 10^5$	$1,70 \times 10^5$	$1,74 \times 10^5$

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - Formas analisadas para os cálculos da rigidez.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela (2) são mostrados os diferentes valores de rigidez obtidos nos três modelos propostos, o modelo 1 apresentou maior rigidez, uma vez que este é favorecido pela geometria da seção transversal. Portanto será a configuração definida de estrutura a ser analisada a partir de agora

4.3 Determinação das ações devidas ao vento

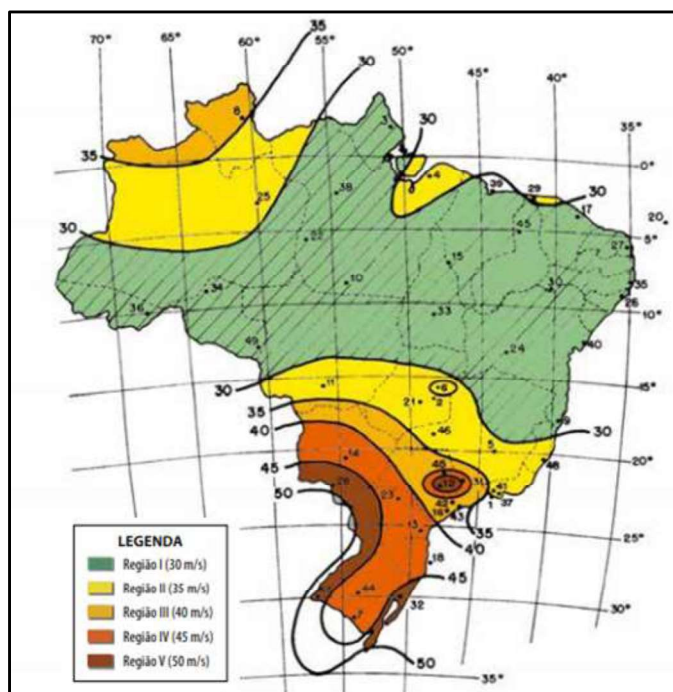
A determinação das forças devidas ao vento é feita de acordo com a Norma NBR 6123:1988. Para a estrutura em questão, a determinação dessas forças será feita para a direção de 0° , ou seja, onde há maior incidência de vento na estrutura.

4.3.1 Cálculo da velocidade característica do vento

Para se determinar a velocidade característica do vento é necessário levar em consideração alguns aspectos, citados a seguir.

- a) Velocidade básica do vento para a região da cidade de Alegrete-RS: $V_0=45\text{m/s}$, segundo o mapa de isopletas Figura (14).

Figura 14 - Mapa de isopletas.



Fonte: NBR 6123:1988.

b) Determinação dos fatores utilizados no cálculo.

-Fator topográfico (S_1): $S_1=1,0$, justifica pelo fato do terreno ser fracamente acidentado, (Item 5.2 da ABNT NBR 6123:1988).

-Fator de rugosidade do terreno e dimensões da edificação (S_2): Para Categoria II: Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Classe A: Toda a edificação na qual a maior dimensão vertical não exceda 20 m (Itens 5.3.1 e 5.3.2 da ABNT NBR 6123:1988). Com os parâmetros descritos calcula-se S_2 através de:

$$S_2 = bF_r(z/10)^p \quad (32)$$

Para: F_r : fator rajada ($F_r=1,0$), b e p : são parâmetros meteorológicos (Para a categoria II e A, os parâmetros meteorológicos $b=1,0$ e $p=0,085$), z : altura.(Anexo A da ABNT NBR 6123:1988).

Para a torre o valor de S_2 será calculado para faixas de variação de altura de 0,9 metros.

c) O cálculo da velocidade característica (V_k) do vento é dada por:

$$V_k = V_0 S_1 S_2 S_3 \quad (33)$$

Para: S_3 : é o fator estatístico, onde é baseado em conceitos estatísticos, considera o grau de segurança requerido e a vida útil da edificação, portanto $S_3=0,95$, justifica por possuir baixo fator de ocupação.

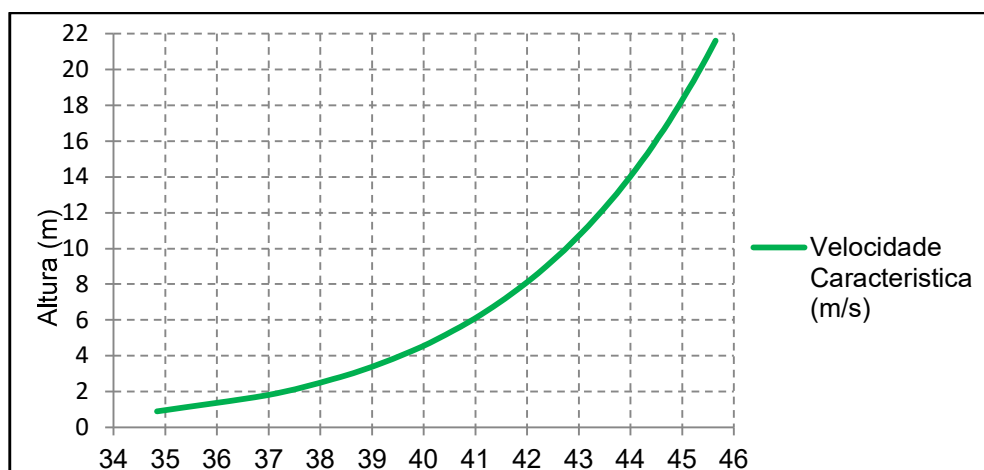
d) Cálculo da pressão dinâmica do vento (q) é determinada pela expressão:

$$q = \frac{\rho}{2} V_k^2 \quad (34)$$

Onde ρ : é igual a $1,226 \text{ kg/m}^3$, definido nas condições normais de temperatura e pressão atmosférica, 15°C e 1 atm , respectivamente.

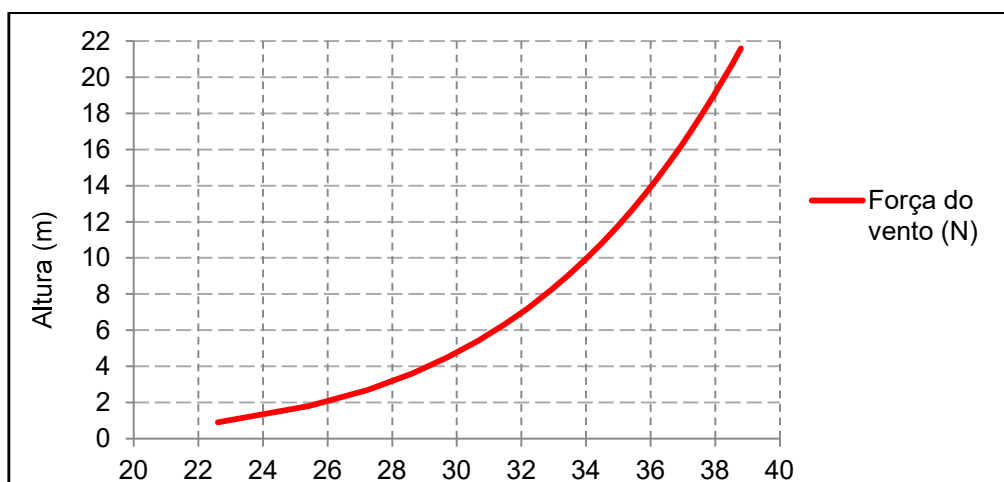
As Figuras (15), (16) e (17) mostram os valores de Velocidades característica do vento, força do vento e pressão dinâmica em função da altura da estrutura. Onde os perfis são semelhantes, em razão do fator rugosidade do terreno e dimensões da edificação (S_2) que aumenta em função da altura, conseqüentemente aumenta a velocidade, pressão e força, as quais estão interligadas pelas equações descritas acima.

Figura 15 - Velocidade característica do vento em função da altura



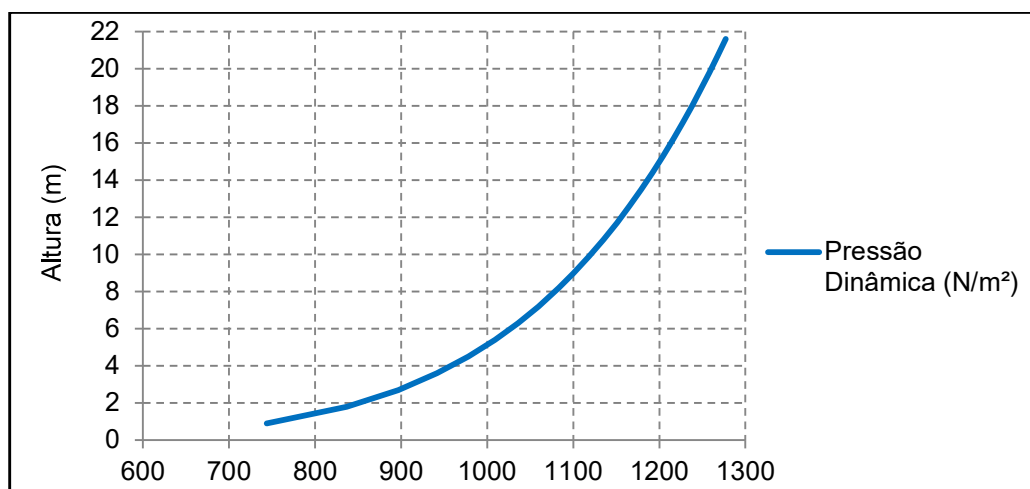
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - Força do vento em função da altura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 - Pressão Dinâmica em função da altura da estrutura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Determinação das forças devido ao vento

Forças para ação do vento perpendicular a estrutura, tem-se o cálculo de força de atrito:

$$F_a = C_a q A_{Total} \quad (35)$$

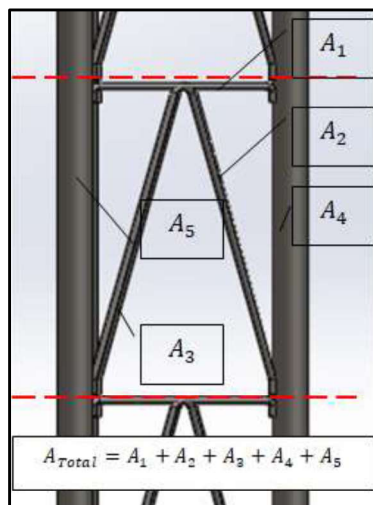
$$R_e = 70000 V_k \phi \quad (36)$$

$$A_n = L \phi \quad (37)$$

Como o vento é perpendicular a estrutura, a força devido ao vento em Y será igual a força de atrito. Para: A_{Total} : área de sombra da seção, $A_{Total} = 0,025314 \text{ m}^2$, Figura (18), C_a : coeficiente de arrasto, que pelo cálculo de Reynolds equação (36) $8,15 \times 10^4 \leq Re \leq 1,07 \times 10^5$ portanto tem-se o coeficiente de arrasto de $C_a = 1,2$ (Tabela 13 da ABNT NBR 6123:1988).

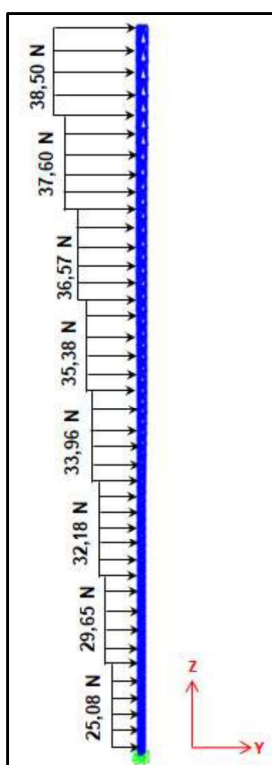
Na Figura (16), nota-se que pode ser utilizada a média das forças em função dos módulos no carregamento, isto se justifica pois há uma variação muito pequena de força com relação a área de sombra para cada módulo de 2,7 metros. O carregamento na estrutura mostrado na Figura (19), sendo aplicado na direção do eixo Y positivo.

Figura 18 - Descreve a área de sombra da seção.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 - Carregamento estático aplicado na estrutura.

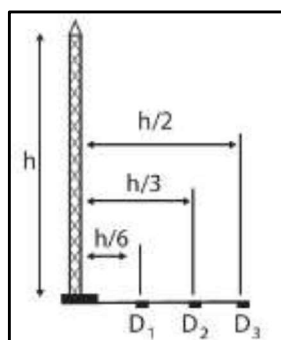


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Modelagens dos estais

Segundo EPE, (2015), a distância dos pontos de ancoragem em relação à base da estrutura, depende da altura da estrutura, ou seja, o ponto de ancoragem mais afastado da estrutura se encontra em uma distância igual à metade da altura da torre. A Figura (20) exemplifica essa relação.

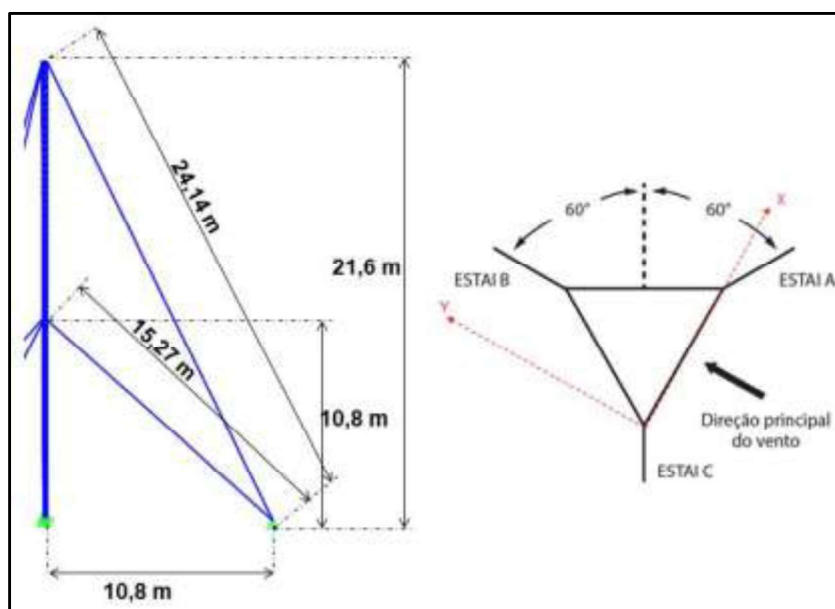
Figura 20 - Relação entre a altura da torre e o ponto de ancoragem.



Fonte: EPE, 2015.

A torre a ser projetada nesse trabalho, será amarrada por estais, do tipo trançado, com 7 fios duplamente galvanizados, de diâmetro nominal da cordoalha de $\phi = 6,35$ mm, dispostos em dois níveis na estrutura, presos por olhais e fixados no solo através de três chumbadores. Opta-se por este tipo de estais, por ser usualmente aplicado em ancoragens de torres. Como a estrutura será de 21,6 metros de altura os estais serão dispostos ao topo e ao meio da estrutura e em três direções iguais de 120° . O dimensionamento dos estais segue o catálogo da CIMAF, Companhia industrial e mercantil de artefatos de ferro, 1995.

Figura 21 - Aplicação dos estais na estrutura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a representação dos estais como mola considera-se a rigidez equivalente dos cabos, desprezando o seu amortecimento. A rigidez é determinada

a partir da expressão (38), onde o módulo de elasticidade e a área da seção foram citados anteriormente.

$$k = \frac{EA}{L} \quad (38)$$

Tabela 3 - Rigidez das molas em relação aos cabos.

Comprimento do Cabo	Rigidez
$L_1 = 24,14 \text{ m}$	$k = 1,93 \times 10^5 \text{ (N/m)}$
$L_2 = 15,27 \text{ m}$	$k = 3,05 \times 10^5 \text{ (N/m)}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Descrição dos modelos numéricos

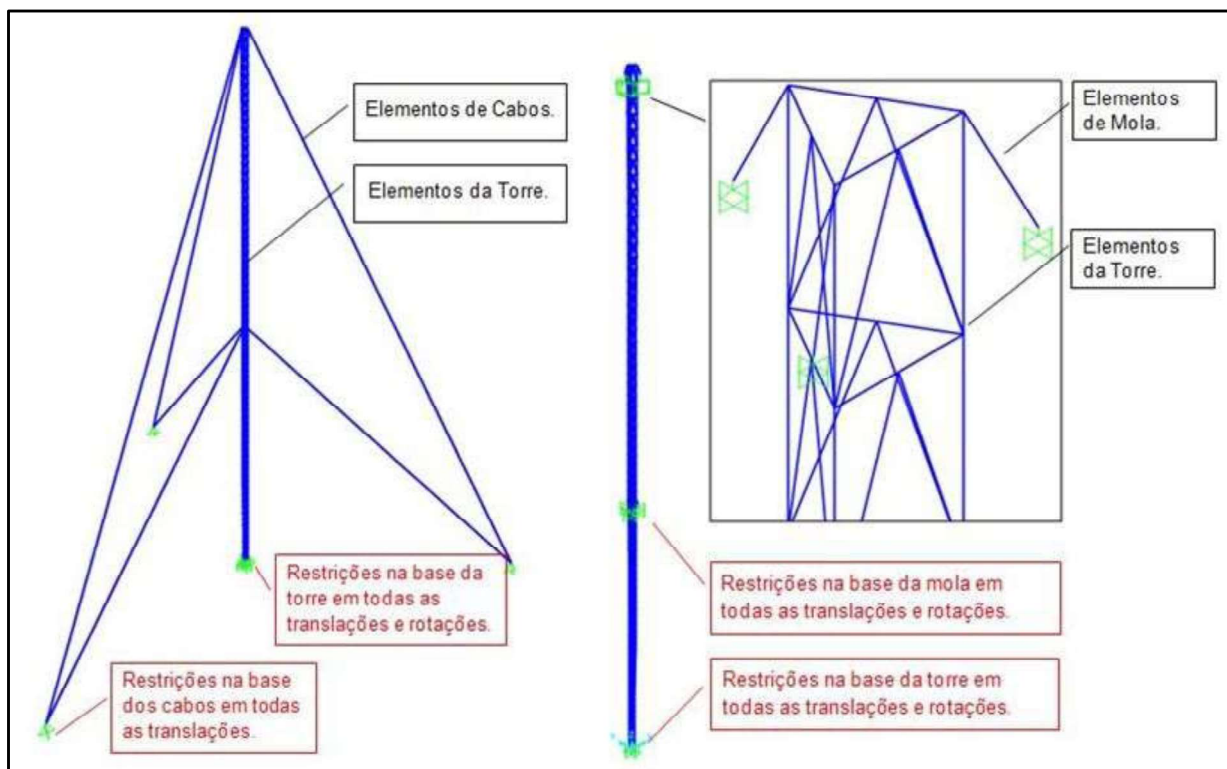
Os tubos verticais e as barras redondas que compõe a torre são representados no modelo numérico com o mesmo tipo de elemento, onde possuem as mesmas características físicas de módulo de elasticidade de 200 Gpa, coeficiente de Poisson de 0,3 e densidade de 7850 kg/m³.

A Figura (22) mostra os dois modelos usando elementos de pórtico espacial, sendo que num dos modelos os estais estão sendo representados como elementos de cabo e no outro modelo de torre os estais foram substituídos por elementos de mola. Para ambas as representações a área da seção transversal será de $3,16 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, o módulo de elasticidade no valor de 147 Gpa, o coeficiente de Poisson igual a 0,27 e densidade de 5685 kg/m³, propriedades mecânicas obtidas do catálogo da CIMAF, Companhia industrial e mercantil de artefatos de ferro, 1995.

Tanto a estrutura quanto os elementos de molas estão engastados em todas as direções, ou seja, estão restringidos em todos os graus de liberdade, já os elementos de cabos estão engastados na forma que restringem só três graus de liberdade em translação, como mostrado na Figura (22).

Define-se para que os elementos de mola e cabos se comportam somente em tração axialmente, visto que os estais, na prática, trabalham somente em tração, aproximando assim o modelo numérico ao real.

Figura 22 - Modelos de torre completa usando elementos de cabos para a representação dos estais com suas respectivas condições de contorno.



Fonte: Elaborado pelo autor.

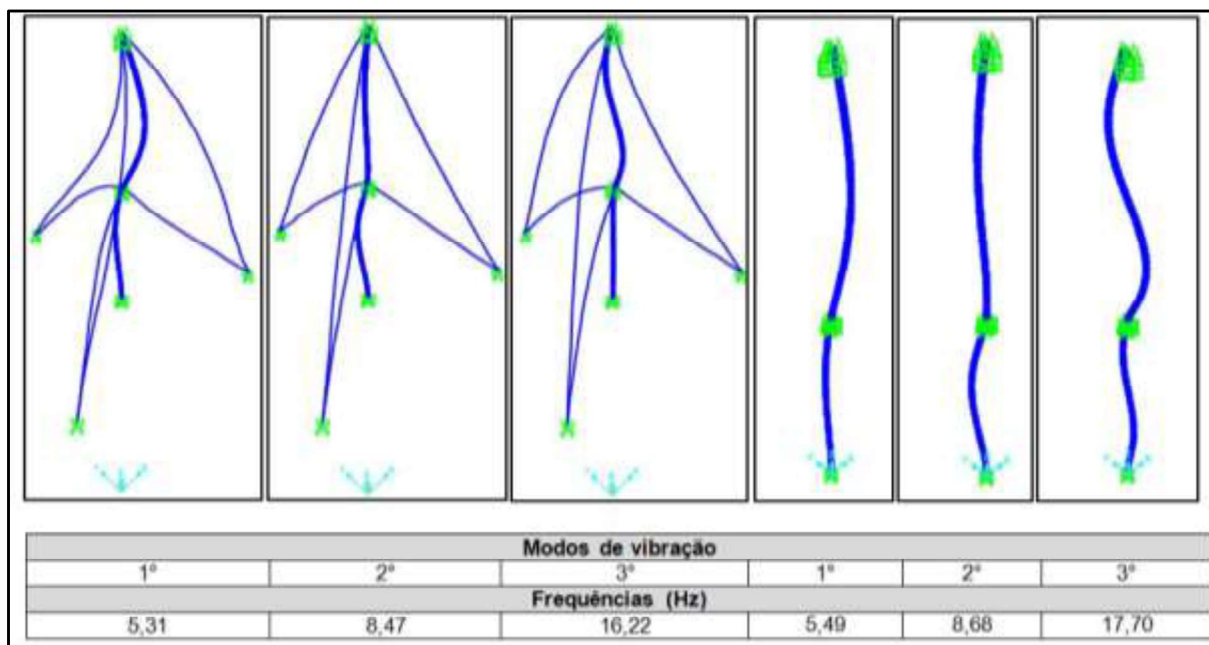
5 RESULTADOS

5.1 Análise Modal da estrutura

Para garantir que as duas estruturas se comportem de forma fiel a uma estrutura real, determinou-se os modos de vibrações e frequências naturais de ambos os modelos. Na Figura (23) são apresentados os três primeiros modos de vibrações dos modelos de torre completa usando elementos de cabos e molas para a representação dos estais. Para alcançar os modos de vibrações e frequências em ambas as representações foram utilizadas a rigidez calculada na Tabela (3), com área da seção transversal e módulo de elasticidade descritos no item (4.5).

Ambas as representações, as formas modais e as frequências se assemelham, mesmo existindo uma leve diferença entre as frequências naturais de vibração, que se dá pela aproximação numérica entre as duas representações e pela proximidade existente na rigidez das molas com a rigidez dos cabos.

Figura 23 - Modos de vibrações das estruturas com elementos de cabos e molas para representação dos estais e suas frequências.



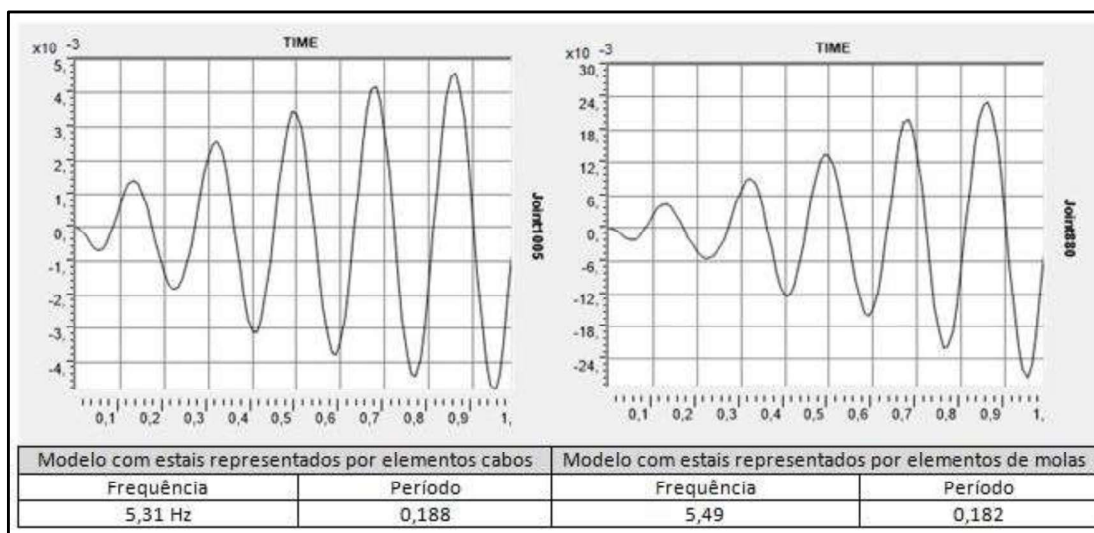
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Análise no domínio da frequência e do tempo

A análise no domínio da frequência para os modelos executados serve para validar e verificar a resposta dos modelos submetidos à análise modal, obtendo-se as respostas no domínio da frequência.

Escolheu-se um ponto ao longo da altura da estrutura, no caso o ponto onde há maior deslocamento, o qual se encontra a 16,2 metros de altura. Então se utiliza o comando *fuctions times history* do software SAP2000, admitindo uma função cosseno, com os períodos para a primeira frequência de ambos os modelos, para período sendo o inverso da frequência, presume-se também que a função tenha 10 ciclos, análise linear, transiente, com solução modal, com carga do tipo de aceleração para que a estrutura entre em ressonância, contudo o software SAP 2000 com esses parâmetros define automaticamente a resposta harmônica mostrada na Figura (24). Para ambos os modelos a estrutura entra em ressonância no primeiro período das frequências analisadas anteriormente.

Figura 24 - Resposta da análise harmônica.

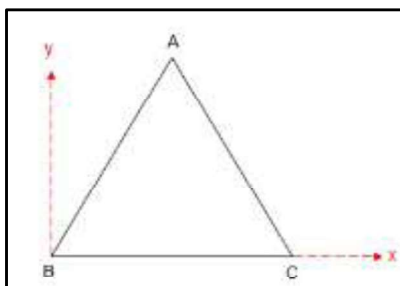


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Reações na base da estrutura

Aplicando-se o carregamento da força estática dos ventos na estrutura obtêm-se as reações na base da estrutura para a representação de elementos de mola e cabos para os estais, nas Tabelas (4) e (5), são mostradas as forças e os momentos que a estrutura sofre ao carregamento.

Figura 25 – Esquema dos pontos de reações na base da estrutura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 - Reações na base da estrutura com elementos de mola.

	Vértice A	Vértice B	Vértice C
Reações	$F_x = 0 \text{ N}$	$F_x = - 65,85 \text{ N}$	$F_x = 65,85 \text{ N}$
	$F_y = -290,07 \text{ N}$	$F_y = -186,48 \text{ N}$	$F_y = -186,48 \text{ N}$
	$F_z = 6923,88 \text{ N}$	$F_z = -2759,48 \text{ N}$	$F_z = -2759,48 \text{ N}$
Momentos	$M_x = 24,9 \text{ Nm}$	$M_x = 25,03 \text{ Nm}$	$M_x = 25,03 \text{ Nm}$
	$M_y = 0 \text{ Nm}$	$M_y = -0,26 \text{ Nm}$	$M_y = 0,26 \text{ Nm}$
	$M_z = 0 \text{ Nm}$	$M_z = -2,51 \text{ Nm}$	$M_z = 2,51 \text{ Nm}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

O carregamento das forças do vento é aplicado perpendicular à estrutura, em direção do eixo Y (positivo), como mostrado na Figura (19), nota-se que haverá reações de apoio na direção de X, de intensidades iguais, mas de direções opostas, isso ocorre também para Y, e Z, nos vértices B e C, entretanto na restrição do vértice A isso não ocorre, pelo mesmo se localizar a certa distância dos eixos de aplicação das forças. Constata-se também que os momentos nas três direções satisfazem o previsto pela estrutura.

Empregando-se o mesmo carregamento, ou seja, de mesma direção e intensidade para a estrutura com elementos de cabos, tem-se as seguintes reações na base da estrutura.

Tabela 5 - Reações da base da estrutura com elementos de cabos.

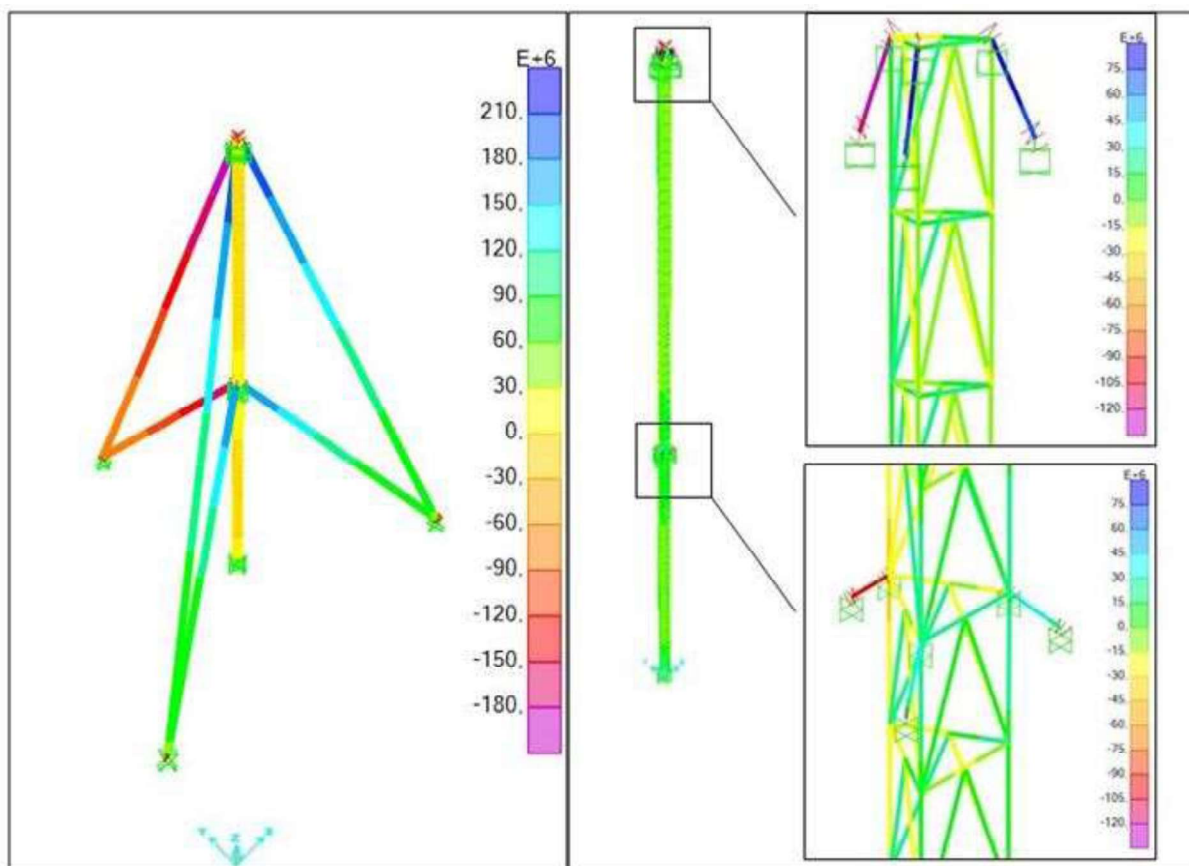
	Vértice A	Vértice B	Vértice C
Reações	$F_x = -0,13 \text{ N}$	$F_x = -66,72 \text{ N}$	$F_x = 66,85 \text{ N}$
	$F_y = -293,55 \text{ N}$	$F_y = -188,57 \text{ N}$	$F_y = -188,34 \text{ N}$
	$F_z = 6948,9 \text{ N}$	$F_z = -3030,28 \text{ N}$	$F_z = -3030,3 \text{ N}$
Momentos	$M_x = 25,2 \text{ Nm}$	$M_x = 25,34 \text{ Nm}$	$M_x = 25,3 \text{ Nm}$
	$M_y = -0,02 \text{ Nm}$	$M_y = -0,25 \text{ Nm}$	$M_y = 0,27 \text{ Nm}$
	$M_z = 0,03 \text{ Nm}$	$M_z = -2,41 \text{ Nm}$	$M_z = 2,47 \text{ Nm}$

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 Tensões

Aplicando-se o carregamento da estrutura obtêm-se os diagramas de tensões, na qual essas tensões (força por unidade de área) atuam positivamente na face onde ocorre a aplicação do carregamento e negativamente na face oposta. A Figura (26) exemplifica as tensões na estrutura, o software utiliza unidades em SI.

Figura 26 - Tensões na estrutura com elementos de cabos e molas como representação dos estais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se que os elementos de mola na face dos eixos XZ onde é aplicado o carregamento estão sobre efeito de tração, já no elemento do lado oposto está sobre compressão, isto se satisfaz, logo a intensidade das tensões são menores que a tensão de escoamento tanto do material da estrutura, que o limite de escoamento é de 250 MPa, quanto do material dos elementos de mola, que possui resistência a tração aproximada em 1765,2 MPa a 1961,33 MPa.

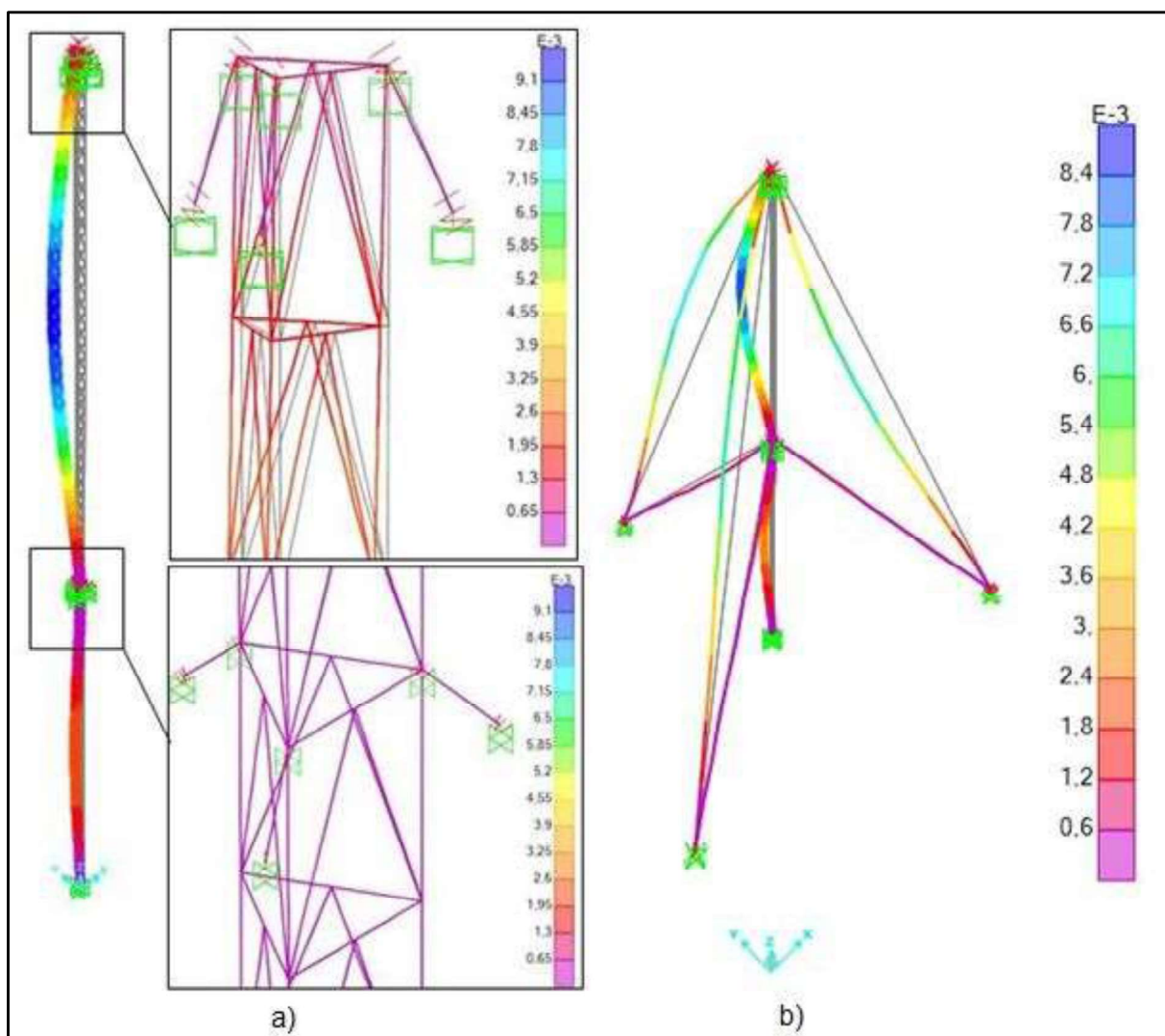
Têm-se os mesmos resultados para a estrutura de elementos de cabos nas representações dos estais, onde os cabos da face onde é aplicado o carregamento estão sob tração como indicado na Figura (26), e os cabos do lado oposto estão sob compressão, demonstrando assim que o carregamento está aplicado corretamente.

5.5 Deformação da estrutura

A deformação da estrutura após a aplicação do carregamento devido ao vento mostra-se convincente para ambos os modelos de representações. A Figura (27) exhibe as deformações resultantes da estrutura com elementos de cabos e molas.

Pois a deformação máxima na estrutura é de 9,1 mm com elementos de mola e 8,4 mm com elementos de cabos, que para a estrutura ser de 21,6 metros de altura, essa deformação é muito pequena.

Figura 27 - Deformação resultante da estrutura a) dos elementos de mola e em b) dos elementos de cabos, em unidades em SI.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste projeto foi alcançado com o estudo numérico envolvendo a estrutura de torre treliçada estaiada, com seção transversal triangular equilátera, submetida à ação do carregamento das forças devido ao vento. Para o estudo numérico, foram apresentados os procedimentos para a determinação das forças estáticas do vento na estrutura, seguindo a metodologia apresentada pela norma NBR 6123.

As propriedades geométricas da estrutura se satisfazem, são de geometrias e materiais de simples aquisição, tratando-se de uma estrutura bem aerodinâmica, de fácil fabricação e montagem. A escolha do “modelo 1” como o mais apropriado para a modelagem da estrutura, por apresentar uma maior rigidez a flexão;

Foram determinados os parâmetros necessários para o dimensionamento da base da estrutura, assim como o dimensionamento do reboque que levará a estrutura, assim como a caracterização e obtenção dos esforços estáticos na torre;

A resposta da estrutura com o carregamento estático se assemelha quando aplicado os cabos e as molas, ou seja, as representações de elementos de cabos e molas para os estais, atingiram reações de apoios semelhantes, deformações nas estruturas muito pequenas, na qual indica que as representações puderam ser comparadas.

Obtenção dos parâmetros modais e frequência natural, sendo que estas servirão de base para o cálculo da resposta da estrutura sob ações dinâmicas.

Reitera-se a necessidade de considerar a análise dinâmica da estrutura, pois a análise estática é apenas uma simplificação, podendo conduzir a resultados contrários à segurança da estrutura.

6.1 Propostas para trabalhos futuros

Como propostas para trabalhos futuros têm-se:

- Análise de flambagem da estrutura;
- Verificar o comportamento da estrutura quando carregado com equipamentos;
- Dimensionamento da base e do reboque, para que a estrutura possa ser volante;
- Aplicação do carregamento dinâmico, segundo a NBR 6123.

REFERÊNCIAS

ANEEL, “**Atlas de energia elétrica do Brasil**” - Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. Ed. – Brasília: Atlas, 2008.

ANEEL, “**Matriz de energia elétrica**”. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acessado em 01/05/2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: “**Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas e concreto de edifícios**”. Rio de Janeiro. 2008.

BLESSMANN, J. “**O vento na engenharia estrutural**”. Porto Alegre: 1. Ed. UFRGS, 1995.

CIMAF, 1995. “**Companhia Industrial e Mercantil de Artefatos de Ferro**”, Catálogo C-10. Manual Técnico.

DACAL T. M. L. A. “**Análise da resposta dinâmica em estrutura esbelta sobre diferentes condições de carregamento através do uso de métodos numéricos**”. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pampa - UNIPAMPA. Alegrete, 2017.

EPE, 2015. “**Instalação de Estações Anemométricas**”, Empresa de Pesquisa Energética. 1. Ed. Rio de Janeiro.

JÚNIOR, J. P. “**Modelagem e simulação do campo de velocidades do vento em tormentas elétricas**”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, tese de doutorado, 2005.

MENIN, R. C. G. “**Análise estática e dinâmica de torres metálicas estaiadas**”. Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Dissertação de Mestrado, 2002.

MERCE, R. N., “**Análise Dinâmica de Torres Metálicas Autoportantes sob Ação do Vento**”, Dissertação de Mestrado DM-007A/2003, Universidade de Brasília- UnB, Brasília, 2003.

NUNES, A. C. “**Estudo da resposta dinâmica de uma estrutura esbelta submetida a diferentes excitações**”. Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA. Trabalho de conclusão de curso. Alegrete, 2018.

PINTO, M. de O. “**Fundamentos de energia eólica**”. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PUGLIA, V. B. “**Análise de alguns aspectos no estudo de torres estaiadas**”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, dissertação de mestrado, 2009.

RAO, S. S. “**Vibrações Mecânicas**”. 4ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

REQUENA, J. A. V., FORTI, T. L. D, CAZARIM, N. S. F., ARAÚJO, A.H. M., “**Automação de Projeto e Análise de Torres Metálicas Utilizando Perfis Tubulares**”, Congresso Internacional da Construção Metálica- III CICON 2005, Ouro Preto-MG, 2005.

RIBEIRO, M. I. O., SILVA, J. G. S., ANDRADE, S. A. L., VELLASCO, P. C. G. da S., “**Modelagem Estrutural de Torres Estaiadas de Aço para Telecomunicações**”, Proceedings of the XXVI Iberian Latin- American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE 2005, Paper CIL 01-0908, Guarapari, 2005.

SANTOS, E. F., CORREA, W. da L., OLIVEIRA, T. J. L., PFEIL, M. S., “**Análise de comportamento Estrutural de uma Torre Metálica Submetida à Ação do Vento**”, Proceedings of the XXVI Iberian Latin - American Congress on Computational Methods in Engineering – CILAMCE 2005, Paper CIL 15-0525, Guarapari, 2005.

SECCIONAL, “**Torre Monotubular**”. Disponível em: <
<https://www.seccional.com.br/catprodutos/telecom/>>. Acessado em: 08/05/2019.

SILVA, S. “**Vibrações Mecânicas**”. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Foz do Iguaçu, 2º Ed. 2009.

SOEIRO, N. S. “**Análise Modal Experimental**”. Universidade Federal do Pará, 2001.

THEGOLFCLUB, “**Slip joints on twin towers**”. Disponível em: <<https://thegolfclub.info/related/slip-joints-on-twin-towers.html>>. Acessado em: 08/05/2019.

TOLMASQUIM, M. T. “**Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**” – EPE: Rio de Janeiro, 2016

TORRES TELECOM, “**Torres estaiada e treliçada**”. Disponível em: <<http://www.torrestelecom.com.br/fotos>>. Acessado em: 09/05/2019.

ZAMPIRON, I. “**Crítérios de torres autoportantes de telecomunicações e aplicações**”. 2008. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.