Análise Comparativa Entre Diferentes Geometrias de Torres de Transmissão do Tipo Autoportante Frente à Ação do Vento

Andrés Felipe Patarroyo Gracia[1]
Wagner Queiroz Silva[2]

Resumo

Este artigo tem como objetivo analisar estruturas metálicas de torres de transmissão com diferentes geometrias do tipo autoportante, considerando a ação do vento. Busca-se avaliar o comportamento mecânico para quatro diferentes tipologias. Na primeira parte do trabalho, estudaram-se as diferenças, vantagens e desvantagens entre algumas tipologias de torres de transmissão; seguidamente, modelaram-se quatro geometrias de torres utilizando-se o *software* Robot Strutural Autodesk® e seus recursos para aplicação da pressão do vento. Os resultados dos deslocamentos e esforços devidos à ação do vento de cada modelo foram estudados como parâmetros para uma avaliação destas tipologias com relação à eficiência estrutural. Foi possível observar que os modelos de torres de transmissão do tipo autoportante com geometria tronco-piramidal oferecem um melhor desempenho em relação aos esforços causados pelo vento e podem resultar em estruturas mais seguras e mais econômicas para esse tipo de ação.

Palavras-chave: torres metálicas, torres autoportantes, ação do vento, *Autodesk Robot Structural Analysis*.

1 Introdução

Devido ao crescimento exponencial das populações urbanas, a necessidade de expandir a rede de transmissão de eletricidade aumentou consideravelmente no Brasil e em todo o mundo. O cenário da produção de energia elétrica no Brasil é constituído principalmente por usinas hidrelétricas, e a energia é transportada por linhas de transmissão para as diferentes regiões do país. Na maioria dos casos, a transmissão é realizada por cabos suspensos por postes e torres metálicas (ELIAS, 2016). A garantia da segurança estrutural para estas torres é de fundamental importância para o adequado funcionamento de todo esse sistema.

Uma das primeiras linhas de transmissão de energia no Brasil tinha uma extensão de 2 km e foi construída em 1883, na cidade histórica de Diamantina/MG. O país tem atualmente uma rede de transmissão de energia elétrica de aproximadamente 107.000 km (ANELL, 2019). Observa-se a necessidade de investimentos tanto para a ampliação da rede de distribuição quanto para a manutenção das estruturas existentes.

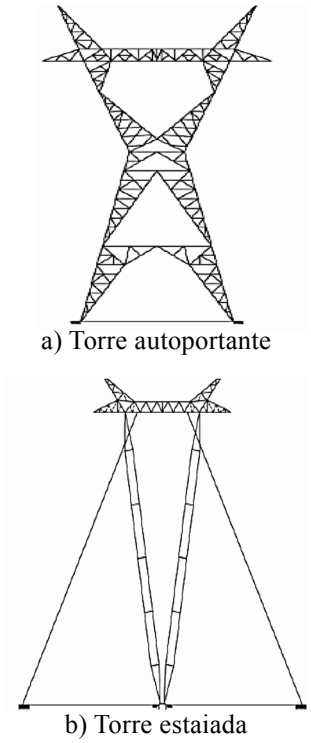

Figura 1 *– Geometria das torres de transmissão.*

1 Curso de Engenharia Civil da Universidade Surcolombiana – Colômbia. andrespatarroyog97@gmail.com
2 D. Sc. Professor Adjunto da Universidade Federal do Amazonas – Brasil. wqs@ufam.edu.br

As torres de transmissão são geralmente estruturas de treliças formadas por perfis de aço e o sistema estrutural pode ser de torres estaiadas ou torres autoportantes. As torres estaiadas são soluções ideais para alcançar alturas elevadas e com alta capacidade de carga estrutural, no entanto, essas torres exigem uma área maior para instalação devido à necessidade dos cabos, dispostos inclinados para garantir a estabilidade da mesma (CARGNIN, 2014). Por outro lado, as torres autoportantes não exigem este mesmo espaço adicional para a sua instalação. Exemplos de geometrias para os dois tipos foram apresentadas na Figura 1.

As torres metálicas no Brasil devem ser projetadas de acordo com as normas brasileiras da ABNT, sendo também possível considerar normas internacionais. As ligações entre as peças são geralmente executadas com uso de parafusos, facilitando assim o transporte, a montagem e a instalação das torres em estruturas modulares. Tais estruturas têm uma relação custo-benefício ideal nas soluções de telecomunicações, telefonia e rádio (ALIAGA, 2018).

É importante realizar uma boa seleção da tipologia estrutural, de acordo com as características do terreno e a depender também da altura da torre, da disponibilidade de material, dos custos e da complexidade do processo de construção. Existem diferentes parâmetros para se avaliar a segurança estrutural de torres metálicas, independentemente do projeto escolhido, como os esforços solicitantes nas barras, o nível de esbeltez e/ou os deslocamentos causados pelas ações externas, como a força do vento. Esse último parâmetro é objeto de estudo deste artigo, pois a ação do vento se torna mais importante para estruturas de grandes alturas e elevada esbeltez.

2 Objetivos

Como objetivo geral, este artigo visa avaliar o comportamento mecânico das torres de transmissão elétrica autoportantes, em termos de deslocamento e de esforços internos.

A partir da análise de quatro geometrias diferentes, pretende-se avaliar o comportamento mecânico e a distribuição de esforços ao longo das peças estruturais de torres metálicas. Objetivamente, pretende-se:

- estudar e comparar as tipologias de torres metálicas de transmissão elétrica com potencial para aplicação na região norte do Brasil;
- avaliar a influência da geometria no comportamento mecânico em relação a deslocamentos de modelos de torres de transmissão elétrica;
- avaliar a influência da geometria na distribuição dos esforços mecânicos e nas reações de apoio frente à força do vento;
- realizar uma comparação geral da eficiência de cada tipologia de torres metálicas, realizando considerações de projeto e também aspectos executivos.

3 Tipologia das Estruturas para Transmissão

As linhas de transmissão elétrica são usadas para transportar eletricidade de baixa, média e alta tensão. O transporte até os centros urbanos é realizado por meio de cabos condutores suportados por torres estruturais. No entanto, a transmissão de energia vai muito além do transporte de energia elétrica, visto que garante também a interconexão entre as diferentes regiões e, portanto, contribui para a gestão eficiente do sistema elétrico do país (CUNHA, 2016).

O projeto de torres, na maioria dos casos, é feito de forma padronizada, composta por estrutura modulares de aço, devido a questões econômicas, processos construtivos e instalação. De acordo com Cargnin (2014), é possível classificá-los com base nos seguintes critérios:

- Quanto à sua função na linha de transmissão:
  - estruturas de suspensão;
  - estruturas de âncora;
  - estruturas para ângulo;
  - estruturas para derivação.
- Quanto ao material utilizado
  - madeira: sua maior aplicação costumava ser para linhas de baixa tensão e até média tensão. São torres fáceis de serem transportadas devido ao seu baixo peso e preço, em comparação com torres de concreto e aço. No entanto, têm uma vida relativamente curta, geralmente não maiordo que 10 anos. Podridão é a principal causa de deterioração, além da suscetibilidade a seres biológicos, como o cupim. Por estes e outros motivos, observa-se atualmente um declínio do uso das torres de madeira;
  - concreto: este tipo de torre é o mais utilizado em redes de baixa tensão. A maior vantagem está relacionada à manutenção, pois o concreto tem elevada resistência às intempéries. Por ser um material mais pesado e devido à suscetibilidade à fissuração, os custos de transporte aumentam consideravelmente;
  - metálico (aço): é o material mais utiliza-

do atualmente para a fabricação de torres de transmissão devido à facilidade de transporte e montagem, e por ser resistente a agentes abrasivos. É utilizado principalmente em torres de média e alta tensão.

- Quanto à forma de resistência às solicitações:
  - estruturas estaiadas: estruturas cuja estabilidade é garantida por cabos de aço sujeitos a tensão de tração. Os cabos absorvem as forças horizontais, transmitindo-as para pontos afastados da estrutura e ancorados no solo por meio de fundações. Precisam abrigar uma área maior em relação às estruturas autoportantes para que estes cabos possam ser ancorados de maneira eficiente;
  - estruturas autoportantes: as solicitações são transmitidas por meio de suas barras (perfis) e sua estabilidade é garantida pelos próprios pontos de apoio na base da torre. Pode oferecer estabilidade sem a necessidade de uma grande área, uma vez que elimina a necessidade dos cabos de aço inclinados.

3.1 Sobre as torres metálicas autoportantes

Quanto à geometria, as torres autoportantes mais comumente usadas em linhas de transmissão são: (a) tronco-piramidal, (b) delta e (c) "face do gato",como mostra a Figura 2. É possível ainda encontrar torres com barras paralelas verticais.

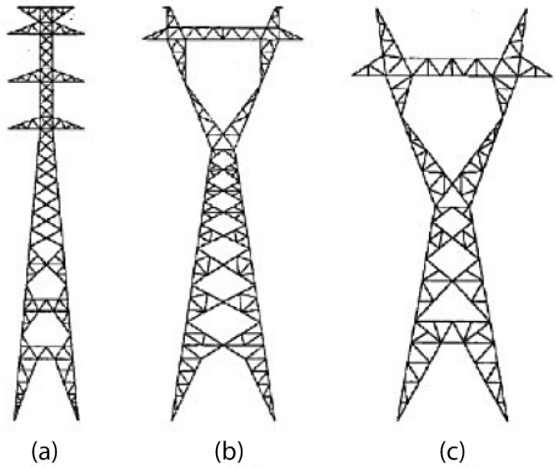

Figura 2 *– Classificação de torres autoportantes em termos de geometria.*

Este artigo concentra o tema do estudo sobre torres metálicas autoportantes de transmissão elétrica da geometria de tronco-piramidal. De acordo com Singh (2009), este sistema estrutural de torres pode ser dividido em três tipos:

- torres com estrutura rígida: são aquelas que, mesmo sujeitas à ação das maiores solicitações, não apresentam deslocamentos elásticos notáveis em qualquer direção;
- torres com estrutura flexível: são aquelas em que ações mais intensas causam deformações sensíveis que, sendo elásticas, desaparecem quando estas solicitações cessam. As vinculações entre barras geralmente são articuladas;
- suportes mistos ou semirrígidos: são estruturas que exibem rigidez em uma das principais direções, como os pórticos ou treliças contraventadas.

Esses tipos de estruturas metálicas são compostos por perfis de aço em formato canal (U) ou cantoneira (L). O aço mais utilizado é o aço-carbono ASTM A36, ou o seu equivalente comercial no Brasil, o aço MR250, que tem tensão de escoamento de 250 MPa, tensão de ruptura entre 400 e 500 MPa. Em relação ao módulo de elasticidade, considera-se o valor especificado pela norma brasileira de 200 GPa.

As barras que compõe a estrutura da torre são classificadas e agrupadas de acordo com o tipo e posicionamento em: montantes, horizontais, diagonais e travamentos. A Figura 3 a seguir ilustra exemplos de cada tipo.

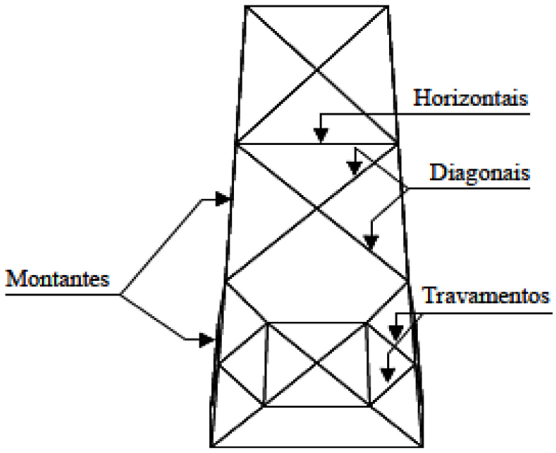

Figura 3 *– Classificação das barras de acordo com o tipo e posicionamento.*

3.2 Força do vento em estruturas de treliças de linhas de transmissão

A determinação dos efeitos de carregamento devido à ação do vento é realizada de acordo com norma brasileira. Para o cálculo das forças de vento, consideram-se aspectos meteorológicos do local, aspectos aerodinâmicos da estrutura da torre, aspectos topográficos e estatísticos. As solicitações produzidas

pela ação do vento são determinados a partir da velocidade básica do vento V_0, de um fator topográfico S1, de um fator de rugosidade S2 e de um fator estatístico de ocupação S3. Para o presente trabalho, considerou-se uma velocidade de vento de 40 m/s para todas as direções. O fator S1 foi tomado igual a 1,0 que se aplica a terrenos fracamente acidentados. Para o cálculo do fator S2, considerou-se categoria de terreno IV (terrenos cobertos com obstáculos numerosos e pouco espaçados).

3.3 Metodologia e modelo estrutural

Quatro modelos de torres de transmissão foram elaborados neste trabalho, utilizando-se o programa computacional *Robot Structural Analysis Professional®* (AUTODESK, 2019). Este programa oferece uma interface simples e autoexplicativa, com recursos que permitem a análise de esforços e deslocamentos em estruturas reticuladas tridimensionais. A geometria da estrutura pode ser importada de programas CAD, o que facilita ainda mais o processo de construção dos modelos. (CANTÁBRICO, 2019). Além disso, o programa oferece como ferramenta o cálculo da força do vento automaticamente a partir dos parâmetros descritos no item 3.2. O usuário deve fornecer como dado de entrada a direção do vento para o qual pretende analisar a estrutura, a velocidade do vento a ser considerada (a depender da região) e os elementos que estão expostos à ação do vento. É também possível definir um perfil de distribuição das pressões do vento ao longo da altura da estrutura.

Neste artigo optou-se por considerar quatro torres com a mesma altura total de 20 metros, sendo as barras constituídas de dois tipos diferentes de perfis de aço. Para fins de comparação, foram adotados os mesmos perfis para as quatro torres de transmissão elétrica, sendo o primeiro perfil uma cantoneira (L) com abas iguais de especificação 51mm x 3,2 mm e o segundo perfil, a cantoneira com abas diferentes, de especificação 64 mm x 51 mm x 4,8 mm. A disposição de cada um dos perfis se deu conforme a seguinte distribuição:

- para a torre dos modelos 1 e 2, o perfil 64 x 51 x 4.8 foi aplicado a todas as peças que se encontram até a altura de 8 m, e o perfil 51 x 3.2 foi atribuído às peças posicionadas entre as alturas superiores de 8 m até 20;
- para a torre dos modelos 3 e 4, o perfil 64 x 51 x 4.8 foi aplicado a todas as peças que se encontram até a altura de 10 m, e o perfil 51 x 3.2, às peças posicionadas entre as alturas de 8 m até 20 m.

Não foram considerados maiores detalhes em relação às peças metálicas, uma vez que o objetivo do trabalho é estabelecer a influência da geometria no funcionamento mecânico da torre com base nas forças geradas pela ação do vento. Em relação à direção do vento, foram analisadas oito direções distintas, conforme mostra o esquema ilustrativo em planta baixa da Figura 4.

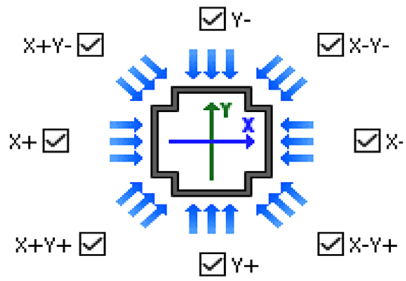

Figura 4 *– Direção da ação do vento.*

As geometrias para os quatro modelos de torres que foram objeto de estudo são ilustradas e descritas a seguir.

- **Modelo da Torre 1:**

Tipologia: torre tronco-piramidal sem barras diagonais nos módulos da base (Figura 5).
Número de barras: 76
Altura total: 20 m
Altura de cada módulo: 4 módulos piramidais de 4 m de altura e 2 módulos verticais de 2 metros de altura

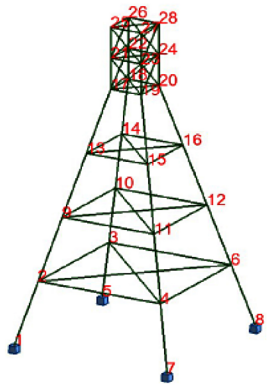

Figura 5 *– Torre tronco-piramidal sem barras diagonais na base.*

- **Modelo da torre 2**

Tipologia: torre tronco-piramidal com barras diagonais nos módulos da base (Figura 6).
Número de barras: 108
Altura: 20 m
Altura de cada módulo: 4 módulos piramidais de 4 m de altura e 2 módulos verticais de 2 metros de altura.

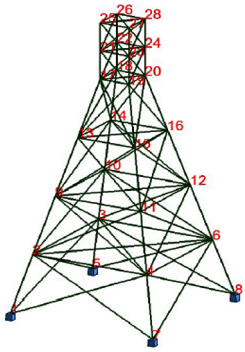

Figura 6 *– Torre tronco-piramidal com barras diagonais na base*

- **Modelo da torre 3**

Tipologia: torre piramidal (Figura 7).
Número de barras: 72
Altura: 20 m
Altura de cada módulo: 4 módulos piramidais de 5 m de altura cada

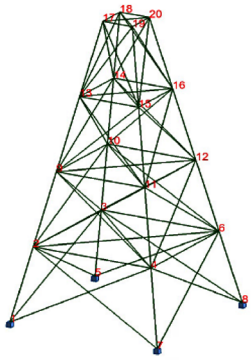

Figura 7 *– Torre piramidal.*

- **Modelo da torre 4**

Tipologia: torre esbelta com geometria vertical constante (Figura 8).
Número de barras: 72
Altura: 20 m
Altura de cada módulo: 4 módulos verticais de 5 m altura cada

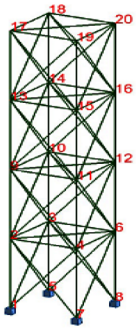

Figura 8 *– Torre esbelta com geometria vertical constante.*

Após ser definida a geometria, são definidos os perfis metálicos (seções transversais) das barras e as propriedades materiais do aço para cada modelo em análise. Os parâmetros a serem extraídos do programa Robot® e que serão analisados para o desenvolvimento deste artigo são:

- os deslocamentos máximos das torres;
- as reações nos apoios;
- peso total das torres metálicas;
- solicitações nas barras.

4 Resultados e Discussões

4.1 Deslocamento devido ao vento

Os deslocamentos para os quatro modelos de torres metálicas foram calculados usando o *software* Robot®. A comparação foi realizada ao longo da altura de cada modelo considerando a mesma direção de atuação do vento. Os resultados são apresentados a seguir.

– Resultados de deslocamentos para o modelo da torre 1

A primeira torre não possui peças diagonais de travamento inclinadas na sua parte inferior, o que foi feito propositalmente para se avaliar a influência destas peças no comportamento da estrutura de treliça. Os deslocamentos podem ser visualizados na Tabela 1 e na Figura 9.

Tabela 1 – Deslocamentos da torre 1 na direção X.

Nó	Altura do nó (m)	Deslocamento no eixo X (mm)
1	0	0
2	4	-135,040
9	8	-242,114
13	12	-290,545
17	16	-206,345
21	18	-103,846
25	20	-1,337

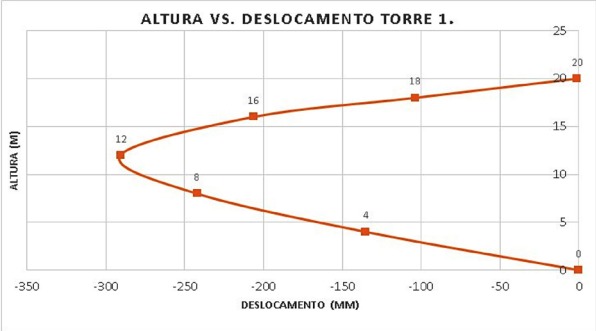

Figura 9 *– Altura x deslocamento torre 1 na direção X.*

A importância das peças diagonais no contraventamento das estruturas metálicas pode ser observada devido à baixa estabilidade da torre quando sujeita a forças do vento. Nesse caso observou-se uma tendência de perda de estabilidade à meia altura da torre, com deslocamentos excessivos, superiores a 200 mm.

– Resultados de deslocamentos para o modelo da torre 2

O segundo modelo estudado tem a mesma geometria da primeira torre, no entanto, possui 32 peças a mais com função de barras diagonais, que servem de contraventamento, proporcionando assim maior rigidez, estabilidade e reduzindo significativamente os deslocamentos. Os resultados são apresentados na Tabela 2 e na Figura 10.

Observa-se uma grande diferença de valores de deslocamento entre os modelos das torres 1 e 2. A diferença no nó nº 13 da torre 1 e nó nº 13 da torre 2 é de 290 mm. Tal diminuição é ocasionada pela presença das peças diagonais entre os nós 1 e 17 no modelo da torre 2. Observa-se também uma uniformização nos deslocamentos em relação à altura, denotando o comportamento de flexão global da torre semelhante a uma coluna em balanço.

Tabela 2 – Deslocamentos da torre 2 na direção X.

Nó	Altura do nó (m)	Deslocamento no eixo X (mm)
1	0	0
2	4	-0,080
9	8	-0,200
13	12	-0,397
17	16	-0,684
21	18	-0,867
25	20	-1,049

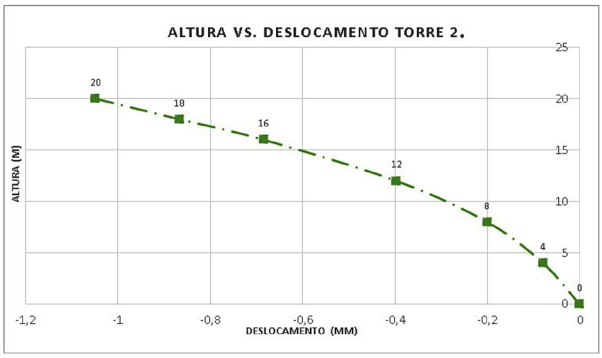

Figura 10 *– Altura x deslocamento torre 2 na direção X.*

– Resultados de deslocamentos para o modelo da torre 3

O modelo da terceira torre estudada tem uma geometria diferente das primeiras duas torres com quatro módulos de instalação e peças de contraventamento ao longo de toda a altura. Os resultados dos deslocamentos para o modelo desta torre são apresentados na Tabela 3 e na Figura 11.

Tabela 3 – Deslocamentos da torre 3 na direção X.

Nó	Altura do nó (m)	Deslocamento no eixo X (mm)
1	0	0
2	5	-0,225
9	10	-0,507
13	15	-0,865
17	20	-1,222

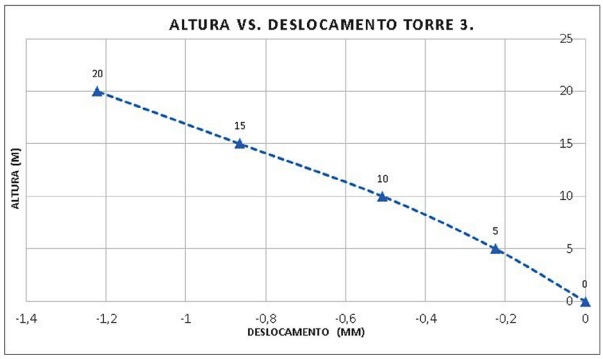

Figura 11 *– Altura x deslocamento torre 3 na direção X.*

Os deslocamentos observados para o modelo da torre 3 apresentaram diferenças mínimas quando comparados ao modelo da torre 2. A diferença numérica entre o máximo deslocamento, que ocorre no topo

(altura de 20 m) é de 0,17 mm para o nó nº 17 em relação ao nó nº 25 do modelo da torre 2.

– Resultados de deslocamentos para o modelo da torre 4

O modelo da quarta torre analisada tem uma geometria diferente das demais, sendo uma estrutura esbelta devido à distribuição verticalizada de apoio em sua parte inferior. Tendo essa distribuição, espera-se que este modelo apresente maiores deslocamentos. Os resultados dos deslocamentos ao longo da altura são apresentados na Tabela 4 e na Figura 12.

Tabela 4 – Deslocamentos da torre 4 na direção X.

Nó	Altura do nó (m)	Deslocamento no eixo X (mm)
1	0	0
2	5	-0,542
9	10	-1,469
13	15	-2,649
17	20	-3,842

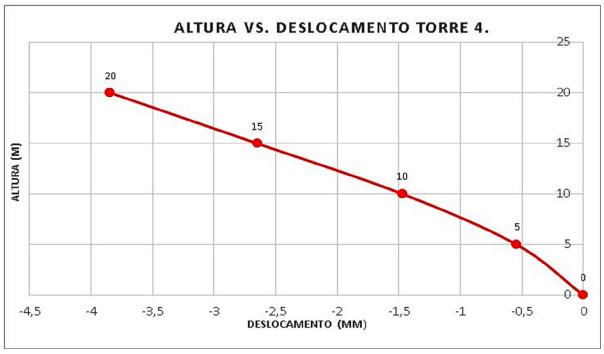

Figura 12 *– Altura x deslocamento torre 4 na direção X.*

Para facilitar uma análise comparativa entre os modelos de torres 2, 3 e 4, apresentam-se os resultados em conjunto na Figura 13. Os resultados do modelo da torre 1 não foram aqui considerados para efeito comparativo por serem muito superiores a estes e por denotarem comportamento típico de instabilidade, o que não seria de fato considerado para uma estrutura real.

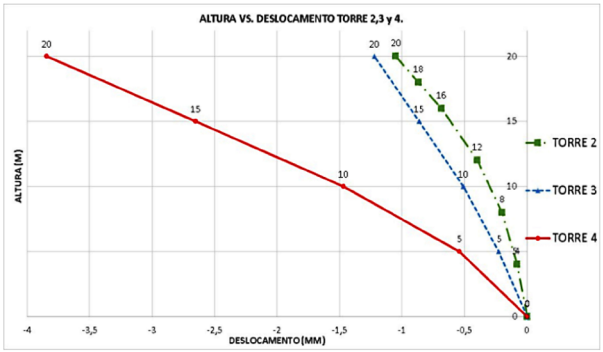

Figura 13 *– Altura x deslocamento de três modelos de torres diferentes.*

Observa-se uma diferença de deslocamento da ordem de 2,2 mm entre o modelo da torre 4 e o modelo da torre 3. A diferença numérica sobe para aproximadamente 2,8 milímetros entre o modelo da torre 4 e o modelo da torre 2. Portanto, o modelo da torre 4 sofre um deslocamento de topo significativamente maior do que os demais, devido à sua geometria mais esbelta e menor base de apoio.

4.2 Reações nos apoios

As magnitudes das reações nos apoios estão principalmente relacionadas ao projeto de fundações, que será mais econômico para menores valores de reações. Nas Tabelas de 5 a 8, são apresentados os resultados das reações para cada modelo, considerando a combinação crítica de vento na direção X e o peso próprio das torres.Salienta-se que os eixos X e Y estão dispostos na direção horizontal (ver Figura 4) enquanto o eixo Z encontra-se na direção vertical, paralela à altura das torres.

Tabela 5 – Reações de apoio da torre 1.

REAÇÕES						
Nó	Fx kN	Fy kN	Fz kN	Mx kN.m	My kN.m	Mz kN.m
1	0,10	0,06	0,1	-0,39	1,245	-0,21
5	0,10	-0,06	0,1	0,395	1,247	0,214
7	0,10	-0,06	-0,1	0,381	1,272	-0,22
8	0,10	0,06	-0,1	-0,37	1,272	0,225

Observa-se que as reações de apoio verticais Fz foram maiores para o modelo da torre 4, e menores para os modelos da torre 1 e 2. Em relação aos momentos fletores de apoio, o modelo da torre 1 apresentou valores consideráveis, da ordem de 1,2 kN.m, enquanto que os demais modelos apresentaram valores não superiores a 0,6 kN.m.

4.3 Peso total das torres metálicas

Para uma análise da distribuição das cargas verticais de cada modelo de torre metálica, o peso total de cada torre foi calculado a partir das propriedades dos perfis adotados.Observa-se que cada modelo possui quantidades e comprimentos de barras diferentes. Os resultados são apresentados nas Tabelas de 9 a 12.

Tabela 6 – Reações de apoio da torre 2.

REAÇÕES						
Nó	Fx kN	Fy kN	Fz kN	Mx kN.m	My kN.m	Mz kN.m
1	1,04	0,72	2,1	-0,01	0,38	0,01
5	1,03	-0,72	2,1	0,01	0,4	-0,01
7	1,04	-0,69	-2	0	0,42	-0,03
8	1,04	0,69	-2	0	0,45	0,03

Tabela 7 – Reações de apoio da torre 3.

REAÇÕES						
Nó	Fx kN	Fy kN	Fz kN	Mx kN.m	My kN.m	Mz kN.m
1	2,25	1,22	3,9	-0,12	0,18	-0,08
5	2,23	-1,19	3,8	0,11	0,18	0,08
7	2,4	-1,09	-3	0	0,37	-0,57
8	2,42	1,11	-3	0	0,38	0,57

Tabela 8 – Reações de apoio da torre 4.

REAÇÕES						
Nó	Fx kN	Fy kN	Fz kN	Mx kN.m	My kN.m	Mz kN.m
1	1,81	1,73	9,4	-0,05	0,09	-0,01
5	1,8	-1,72	9,3	0,06	0,1	0
7	1,99	-1,66	-9,4	-0,04	0,28	-0,17
8	2	1,67	-9,5	0,04	0,28	0,16

Tabela 9 – Peso total da torre 1.

QUANTIDADES				
Tipo	Quant.	Comprimento Total (m)	Peso Kg/m	Peso total (kg)
AÇO				
L2X2X0,125	56	163,58	407,3	**943,94**
L2,5X2X0,18	20	129,62	536,6	

Tabela 10 – Peso total da torre 2.

QUANTIDADES				
Tipo	Quant.	Comprimento Total (m)	Peso kg/m	Peso total (kg)
AÇO				
L2X2X0,125	72	256,22	637,99	**1771,7**
L2,5X2X0,18	36	273,86	1133,78	

Tabela 11 – Peso total da torre 3.

QUANTIDADES				
Tipo	Quant.	Comprimento Total (m)	Peso kg/m	Peso total (kg)
AÇO				
L2X2X0,125	36	187,14	465,98	**1663,6**
L2,5X2X0,18	36	289,3	1197,70	

Tabela 12 – Peso total da torre 4.

QUANTIDADES				
Tipo	Quant.	Comprimento Total (m)	Peso kg/m	Peso total (kg)
AÇO				
L2X2X0,125	36	197,2	491,03	**1307,4**
L2,5X2X0,18	36	197,2	816,41	

O modelo da torre 2 apresentou peso próprio superior aos outros modelos de torres, em decorrência da maior quantidade de barras em sua estrutura. Outra variável que contribui para a diferença entre os modelos estudados é o comprimento das barras, que são maiores para os modelos com geometria tronco-piramidal. O modelo da torre 2, por exemplo, é composto por 72 barras, sendo as peças da parte piramidal (inferior) de maiores comprimentos dada a inclinação da base, o que resultou em um peso total de 1771,77 kg. Já os modelos das torres 3 e 4, resultaram em pesos totais de 1663,68 kg e 1307,44 kg, respectivamente, tendo-se pesos inferiores à torre 2.

É importante avaliar ainda os esforços atuantes na base (reações de apoio), que terão forte influência no dimensionamento das fundações das torres. A fundação do modelo da torre 4, por exemplo, deverá apresentar maiores dimensões e necessidade de maiores reforços, apesar de ter peso próprio inferior aos modelos 2 e 3. Essa torre apresentou maiores valores para as reações de apoio devido à carga gerada pelo vento, conforme descrito no item 4.2.

4.4 Solicitações nas barras

Na análise estática de estruturas, as reações internas são calculadas por equilíbrio a partir das forças externas e das condições de contorno (apoios).

Para a análise do comportamento mecânico de esforços internos nos elementos de barras constituintes da torre, foi analisada a força normal e também os esforços de força cortante e momentos fletores.

4.4.1 Força normal nas peças de apoio

A força normal (ou força axial) atua internamente na direção de eixo da barra. Esta força tende a provocar uma deformação longitudinal e pode ser de tração ou de compressão. Os resultados de forças normais atuantes no conjunto de barras de apoio (barras verticais) localizadas no canto inferior direito (segundo a Figura 4) dos modelos estudados são apresentados na Figura 14.

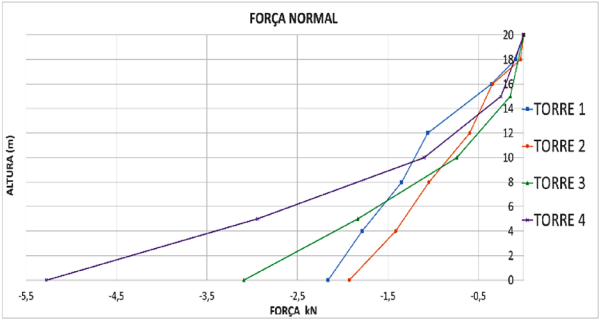

Figura 14 *– Força normal para os quatro modelos de torres.*

Observa-se que o modelo da torre 4 está submetido a uma força normalde compressão na base de maior magnitude (5,3 kN) em comparação aos modelos das torres 1, 2 e 3, devido principalmente a sua geometria e distribuição das barras, onde a base é menor. A maior diferença observada entre os modelos em questão é de 3,3 kN, que ocorre entre os modelos das torre 2 e 4. Para os nós localizados a uma altura de 12 m, a diferença numérica é reduzida para 1,46 kN. Essa redução pode ser explicada pela presença das barras diagonais, que servem de contraventamento, o que influencia na distribuição dos esforços normais e auxilia a estabilidade da estrutura da torre.

4.4.2 Forças cortantes

As forças cortantes ocorrem perpendicularmente à seção transversal das peças. Esta força provoca uma deformação de corte e está associada ao comportamento de flexão simples. Nesse caso a força que produz os maiores esforços cortantes é a força de vento na direção do eixo X (ver Figura 4). A Figura 15 apresenta os resultados para as forças cortantes dos quatro modelos de torres estudados.

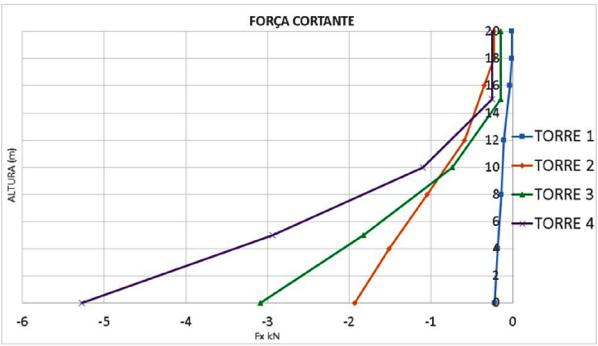

Figura 15 *– Força cortante das quatro torres.*

Verifica-se que a torre 4 está sujeita a uma força cortante de maior magnitude em comparação às torres 1, 2 e 3, com o valor de 5,27 kN. A maior diferença numérica ocorre entre os modelos da torre 1 e da torre 4, com valor de 5,05 kN atuando no nó nº 8 (na base da estrutura). Tem-se ainda que para as barras localizadas em maiores alturas o esforço cortante é menor, denotando para estas um comportamento mais próximo do modelo de treliça, que resiste basicamente a esforços axiais.

4.4.3 Momentos fletores

Os momentos fletores são gerados principalmente pelas forças horizontais atuantes ao longo da altura da estrutura, nesse caso, a ação do vento.

A Figura 16 e a Figura 17 apresentam, respectivamente, os momentos fletores negativos (M-) e positivos (M+) dos quatro modelos de torres estudados para a mesma posição anteriormente considerada.

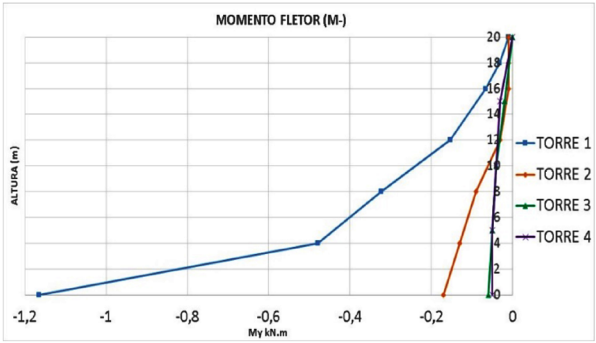

Figura 16 *– Momento fletor negativo (M-) dos quatro modelos de torres.*

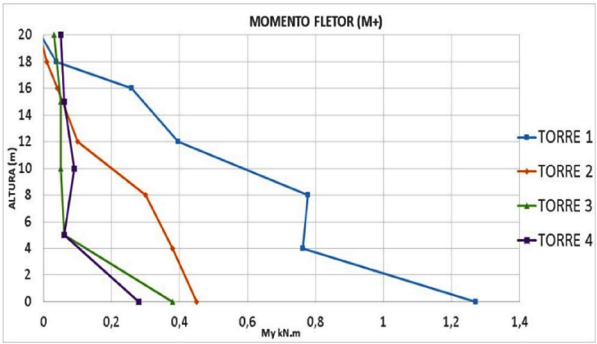

Figura 17 *– Momento fletor positivo (M+) dos quatro modelos de torres.*

Verifica-se diferença mais significativa entre os valores de momentos fletores na base do modelo da torre 1 em relação aos demais modelos. Essa diferença pode ser explicada pela pouca rigidez que esta torre apresentou, devido à ausência de barras diagonais de contraventamento.

Em relação aos modelos de torre 2, 3 e 4, a diferença numérica é pequena, tanto para momentos positivos quanto para momentos negativos. Para estes,

a ordem de grandeza dos valores de momentos fletores é baixa, não superiores a 0,5 kN.m.

5 Conclusões

No presente artigo, foram estudadas as torres de transmissão com sistema estrutural metálico do tipo autoportante. Por meio de literatura técnica, notou-se que as vantagens dessa tipologia estrutural oferecem adequadas condições de aplicação na região norte do país quando comparadas às das torres do tipo estaiadas. Uma das principais vantagens é o aspecto executivo de montagem em módulos.

Observa-se de fato que as torres autoportantes são as mais utilizadas no Brasil, provavelmente devido à sua maior facilidade de instalação, de manutenção, de custo e à menor área de superfície necessária para implantação.

A influência da geometria no comportamento mecânico foi avaliada em relação aos deslocamentos, reações de apoio e esforços mecânicos nas barras constituintes de quatro modelos de torres de transmissão com diferentes geometrias. Dentre as torres analisadas, concluiu-se que o modelo com a geometria esbelta de forma predominantemente vertical e constante – adotado para a torre 4 – apresentou as maiores reações verticais nos apoios, com uma magnitude de 9,53 kN, além dos maiores deslocamentos (3,84 mm) no topo. Isso indica que o sistema estrutural exigirá uma fundação com dimensões maiores e, consequentemente, um maior custo para sua execução. O modelo da torre 1 se mostrou inadequado pela ausência de barras diagonais de contraventamento, sendo que os seus resultados indicaram maiores problemas com a estabilidade estrutural para este caso.

Verificou-se ainda que o modelo da torre 2, com o maior número de barras, terá maior estabilidade e menor deslocamento para as forças do vento. Porém, observou-se uma diferença de peso devido à maior quantidade de perfis: o peso próprio aumentou de 943,94 kg no modelo da torre 1 para 1771,77 kg no modelo da torre 2, representando um aumento de 53,3% devido às 32 barras diagonais adicionadas. Essas barras foram, no entanto, essenciais para garantir a estabilidade estrutural da torre.

Em relação às forças cortantes, percebeu-se que a torre esbelta com geometria vertical constante possui os maiores esforços cortantes, na ordem de 5,27 kN, representando uma diferença de 5,04 kN entre o modelo da torre 4 e o modelo da torre 1. Analisando as forças normais, a torre esbelta com geometria vertical constante apresentou as maiores forças axiaisna base da estrutura (5,3 kN), enquanto a torre tronco-piramidal com barras de contraventamento na base possui as menores forças normais na base da estrutura (1,9 kN). Finalmente, em relação aos momentos fletores, os modelos das estruturas apresentaram uma diferença no caso de momento positivo e negativo das torres tronco-piramidal com e sem barras diagonais na base, na ordem de aproximadamente 1,0 kN.m.

Observa-se assim que a torre tronco-piramidal do modelo geométrico da torre 2 apresentou melhor desempenho em termos de deslocamentos e solicitações, considerando apenas o peso próprio e a ação do vento sobre as torres. Os menores deslocamentos implicam em menor interferência nos equipamentos e nos cabos, o que proporciona maior qualidade na transmissão de energia elétrica e reduz o risco de patologias ou outros problemas nos equipamentos e na própria torre. Isso é importante para a região norte, densamente ocupada por áreas florestais.

Em relação às solicitações esforços, o modelo geométrico da torre 2 apresentou resultados que conduzem a um dimensionamento mais econômico das peças e das fundações. Salienta-se que o presente trabalho manteve foco apenas na análise estática linear para comparação entre geometrias frente à ação do vento.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se realizar a análise de outras geometrias, incluindo também torres estaiadas, e também a consideração de efeitos não lineares no comportamento mecânico. Também se pode variar a altura das torres e os perfis utilizados para as peças componentes.

6 Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR6123. **Forças devidas ao vento em edificações.** Rio de Janeiro. 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR8800 – **Projeto de Estruturas de aço de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**, Rio de Janeiro. 2008.

Aliaga, W. P. **Diseño y simulación de una torre de transmisión eléctrica de una linea de 500KV.** Universidad Nacional de Altiplano, Puno – Perú. 2018.

ANELL. **Agencia Nacional de Energia Elétrica.** Acesso em 18 de 10 de 2019. Disponível em <https://www.aneel.gov.br>. 2019.

AUTODESK. *Robot Strutural Analysis Professional*, versão estudantil. 2019.

Cantábrico, I. T. **Instituto Tecnológico del Cantábrico.** Acesso em 18 de 10 de 2019. Disponível em <https://itcformacionyconsultoria.com/ventajasautodesk-robot/>. 2019.

Cargnin, A. P. **Análise de modelos para torres metálicas treliçadas de linhas de transmissão.** Santa Maria, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria. 2014.

Cunha, G. B. **Análise de sustentabilidade de um projeto de linha de transmissão: o caso da linha 500 kV Tucuruí-Manaus.** Braga, Portugal. 2016.

Elias, K. M. Torres de transmissão de energia elétrica: um novo olhar e possibilidades para o cenário de transmissão Brasileiro. **Congresso Latinoamericano da construção metálica**, 11. 2016.

Gontijo, C. R. **Contribuição á Analise e Projeto de Torres Autoportantes de Linhas de Transmissão.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. 1994.

Singh, K. D. **Análise Estática de Torres Metálicas Treliçadas Autoportantes para Linhas de Transmissão.** Brasília, Brasil: Universidade de Brasília. 2009.