
Cable-stayed towers in transmission lines

Torres estaiadas em linhas de transmissão

Received: 2023-07-16 | Accepted: 2023-08-18 | Published: 2023-08-21

Carlos Eduardo Vicente Chaves Hanhoerster

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-1935-3144>

Universidade Federal Fluminense, Brasil

E-mail: carloshanhoerster@id.uff.br

Luiz Carlos Mendes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1747-5179>

Universidade Federal Fluminense, Brasil

E-mail: lcarlos@predialnet.com.br

LATTES: <http://lattes.cnpq.br/7291153917804236>

ABSTRACT

Electrical energy demand is increasing with development of country where cities become more urbanized. It is necessary more generator plants remaining efficient systems. Many of these plants can not be installed near cities and the importance of lines transmission is a fact. They are important as far as plants, because they are a part of all energy system. All distribution is done to distant sites in an economical way making the minimum of environmental impact. The paper deals with analysis of transmission lines in cable-stayed towers, involving details of the design of a transmission line tower where modeling process of the structure is performed by Tower, an auxiliary software for structural analysis. A good design is a pledge of good functioning of energy distribution. Load tests to evaluate the structures behavior are showed. Recurring faults as wind action, cables rupture, and cascade effect, which cause damage to operation of the line are showed. Optimization methods for structural calculus are suggested. Structural reliability studies in order to improve the design as a whole and avoid future failures are also suggested.

Keywords: Transmission lines; Metallic towers; Modeling structural; Transmission towers.

RESUMO

Com a desenvolvimento crescente do país e da população cada vez mais se urbanizando, a demanda por energia elétrica é crescente. Isso significa dizer que são necessárias novas usinas geradoras de energia, porém, com intuito de manter os sistemas eficientes e seguros, muitas dessas não podem ser instaladas nos exatos locais de consumo. Desse modo, as Linhas de Transmissão são tão importantes quanto as próprias usinas, pois fazem toda distribuição da energia para os locais de interesse de forma economicamente viável, e produzindo o menor impacto ambiental possível. Dessa forma, a viabilidade do projeto é uma etapa vital para as concessionárias, pois um bom projeto garante o funcionamento da distribuição energética sem interrupções ou acidentes. Isso se deve principalmente ao bom projeto das torres de transmissão, que devem ser dimensionadas de modo a otimizar o peso da estrutura garantindo a segurança e longevidade da mesma.

Palavras-chave: Torres estaiadas; Linhas de transmissão; Torres de transmissão; Energia elétrica.

INTRODUÇÃO

As linhas de transmissão são tão importantes quanto as próprias usinas, pois fazem toda distribuição da energia para os locais de interesse de forma economicamente viável, e produzindo o menor impacto ambiental possível. Isso acrescenta mais desafios ao consumo devido a matriz energética do Brasil ser uma das mais verdes do planeta, composta por mais de 50% proveniente da energia potencial da água. As instalações de hidrelétricas apresentam-se extremamente dependentes de sua geografia e, por isso, os locais de produção são frequentemente locais remotos. Desse modo, o estudo visa focar os aspectos das linhas de transmissão, sua concepção, os esforços necessários que as torres devem suportar, as condições de fixação ao solo, que são diversas, e devem variar de projeto para projeto.

Conforme a rede elétrica se amplia, a necessidade de novas formas de transmitir a energia de modo eficiente também amplia. Dessa forma, a tensão de transmissão é importante para determinar o tipo de estrutura a ser utilizado, já que para tensões consideradas Alta Tensão (AT) e Extra Alta Tensão (EAT), acima dos 69kV e 230 kV respectivamente,

O uso de estruturas metálicas é considerado o mais eficiente. Dessa forma, o estudo do dimensionamento de estruturas metálicas é de extrema importância, tendo em vista que a previsão até 2026 é que a Extensão da Rede Básica de Transmissão cresça em torno 14% da sua capacidade atual e sendo 500/525 kV a principal Tensão para Linhas de Transmissão em crescimento.

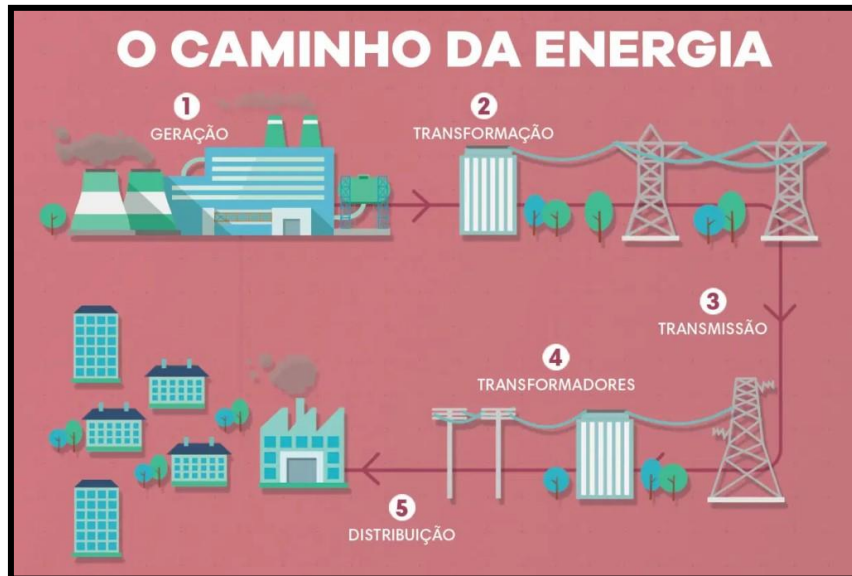
As estruturas mais abundantes numa linha de transmissão são as torres que desempenham a função de apenas suspender os cabos. Apesar de parecer uma tarefa simples, os esforços aos quais os cabos são submetidos são o peso próprio e a ação dos ventos, que tem comportamentos cíclicos, não harmônicos e podem ter diferentes orientações, sendo por isso difíceis de se quantificar com precisão. Desse modo, as previsões para a velocidade dos ventos, as condições extremas que podem ocorrer e as cargas que podem ser introduzidas nas estruturas das torres devem ser calculadas de modo a garantir um coeficiente de segurança suficiente no projeto, de modo que as torres resistam ao tempo para as quais foram projetadas, sem falhas catastróficas e sem fadiga.

O SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL

Um sistema elétrico é composto resumidamente por três componentes: uma parte geradora da energia, a transmissão da energia e a distribuição para os consumidores finais desta energia, conforme se ilustra na Figura 1. Os consumidores podem ser consumidores livres ou cativos. A categoria de consumidores livres são os que adquirem a energia elétrica no mercado de contratação livre para unidades de consumo que satisfaçam, individualmente, os requisitos dispostos nos Art. 14 e 15 da Lei nº 9.074, de 1995. Os consumidores cativos são aqueles que só

é permitida a compra da energia da distribuidora detentora da concessão ou permissão na área onde está localizada a instalação do acessante e, por isso, não participam do mercado livre e são atendidos por condições regulamentadas.

Figura 1 - Caminho da energia elétrica - da produção ao consumo



Fonte: COPREL. Disponível em: <https://brastelnet.com.br/2021/01/20/energia-eletrica-e-o-caminho-que-ela-percorre-para-chegar-ate-a-sua-casa/>. Acesso em: 11/12/2022.

As Linhas de Transmissão de energia elétrica se caracterizam por serem obras de grande extensão linear, geralmente com difícil acesso e são caracterizadas pelas estruturas metálicas. Usualmente, essas estruturas têm fundações do tipo estaca, tubulão e sapata, sempre mediante a prospecção do tipo de solo. As fundações têm papel determinante nesse empreendimento, pois a escolha da solução a ser adotada pode impactar diretamente no tempo de execução da obra e o custo, bem como o prazo para energização da linha.

PERDAS ELÉTRICAS

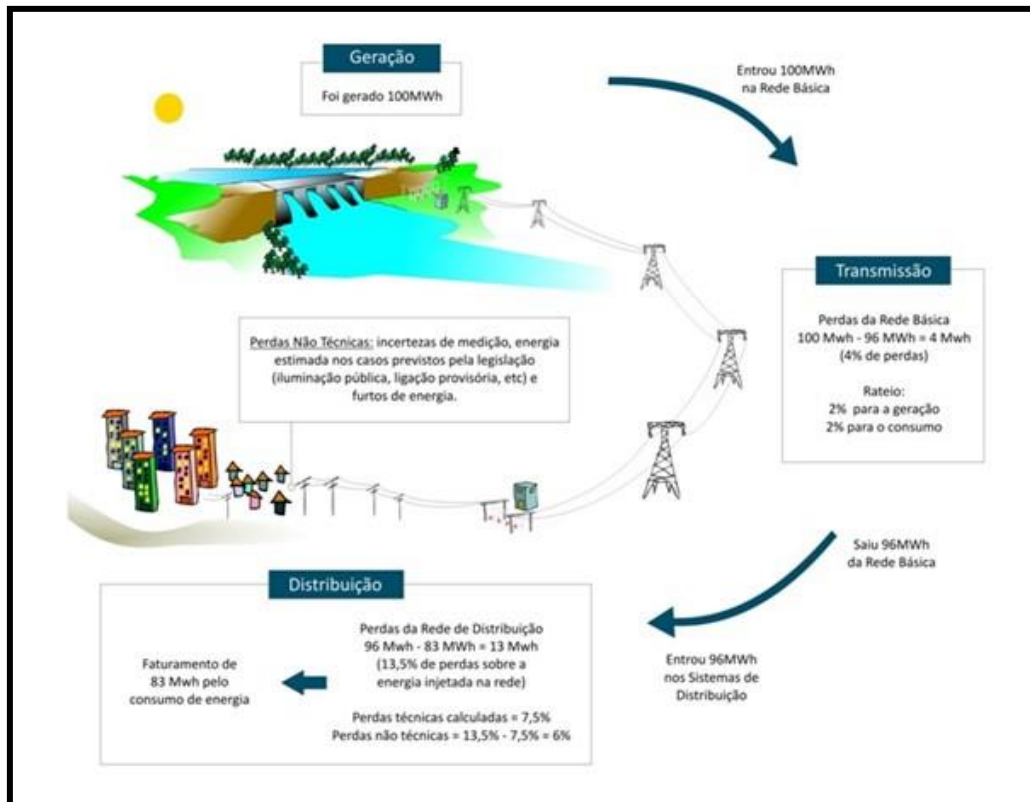
Uma das maiores desvantagens da transmissão de energia a longas distâncias são as perdas elétricas nesse processo. As fontes geradoras nem sempre podem estar próximas aos consumidores ou não conseguem atender a demanda requisitada, portanto, um dos principais objetivos estudados no projeto de uma Linha de Transmissão é o da redução das perdas elétricas. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a energia medida pelas distribuidoras nas unidades de consumo sempre será inferior à energia recebida dos agentes produtores (transmissores, geradores ou outros distribuidores). Essa diferença é denominada perda de energia e é segregada conforme sua origem (GONTIJO, 1994).

Perdas na Rede Básica (ou transmissão) ocorrem entre a geração da energia nas usinas até o limite dos sistemas de distribuição. Mensalmente, as perdas de energia são apuradas conforme dados de medição de geração e a energia entregue nas redes de distribuição pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). A diferença entre elas é o valor das perdas na rede básica e o seu custo é rateado igualmente entre a geradora e o consumidor.

Perdas nas redes de distribuição: ocorrem dentro do próprio sistema de distribuição podendo ser subdividida entre perdas técnicas e não técnicas a depender da sua causa. As perdas técnicas são inerentes do próprio processo de transporte da energia elétrica na rede. Dizem respeito à transformação da energia elétrica em energia térmica nos condutores (efeito joule), perdas nas conversões de tensões nos transformadores, perdas dielétricas e etc. As perdas não técnicas correspondem a diferença entre as perdas totais e as perdas técnicas, considerando assim todas as demais perdas associadas à distribuição da energia elétrica como furtos de energia, erros de medição, unidade consumidoras sem equipamento de medição, entre outros. Esse tipo de perda está diretamente relacionado à gestão comercial da distribuidora.

A Figura 3 ilustra de forma simplificada o ciclo de transmissão de energia elétrica e as respectivas perdas, além demonstrar o cálculo de perdas em cada etapa até chegar ao consumidor final.

Figura 3 - Exemplo simplificado do cálculo das perdas de energia elétrica



Fonte: ANEEL. Disponível em:

<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/distribuicao/perdas-de-energia>. Acesso em: 11/12/2022.

A interconexão desses subsistemas, por meio da malha de transmissão, permite a transferência de energia entre eles, a obtenção de ganhos sinérgicos e explora a diversidade entre os regimes hidrológicos das bacias. Essa conexão entre os recursos de transmissão e geração permite atender à demanda de mercado com segurança e economia. As usinas hidrelétricas estão distribuídas em dezesseis bacias hidrográficas nas diferentes regiões do país. Nos últimos anos ocorreu um grande crescimento na instalação de usinas eólicas, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, o que aumentou a importância dessa geração para o consumo interno. As usinas térmicas, são normalmente localizadas próximas aos grandes centros de consumo, contribuindo para a segurança do Sistema Integrado Nacional..

ETAPAS DOS PROJETOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO AÉREA

Após a definição do local de geração da energia e dos centros consumidores que serão atendidos, o projeto de uma Linha de Transmissão segue nove etapas sequenciais. Os prazos de execução de cada uma delas levam em conta a extensão da linha e o da tensão adotada para a transmissão da energia.

Na viabilização do projeto, esta é a etapa inicial que envolve um estudo de aproveitamento de um determinado recurso energético, levando em consideração a sua capacidade de produção, localização, capacidade de produção e distância em relação aos possíveis centros de consumo. Sua viabilidade depende de fatores como o custo da faixa de terreno onde será construída a linha, topografia da região, voltagem da linha, capacidade de geração, custo da geração e disponibilidade financeira para realização da obra.

No levantamento topográfico e sondagens normalmente é contratado uma equipe de topografia para execução do levantamento topográfico e geração do seu perfil topográfico. Hoje, dependendo do nível de precisão, podem ser realizados levantamentos topográficos por meio de drones com auxílio de câmeras e/ou lasers. Esse recurso apresenta boa precisão e demanda menor tempo para obtenção dos dados topográficos. Nessa etapa também são feitas as análises do solo na faixa de servidão através de sondagens, para definir os locais com probabilidade de montagem das torres. O boletim de sondagem é utilizado pela equipe de projeto de fundações para definir o melhor tipo de fundação para cada torre a ser construída.

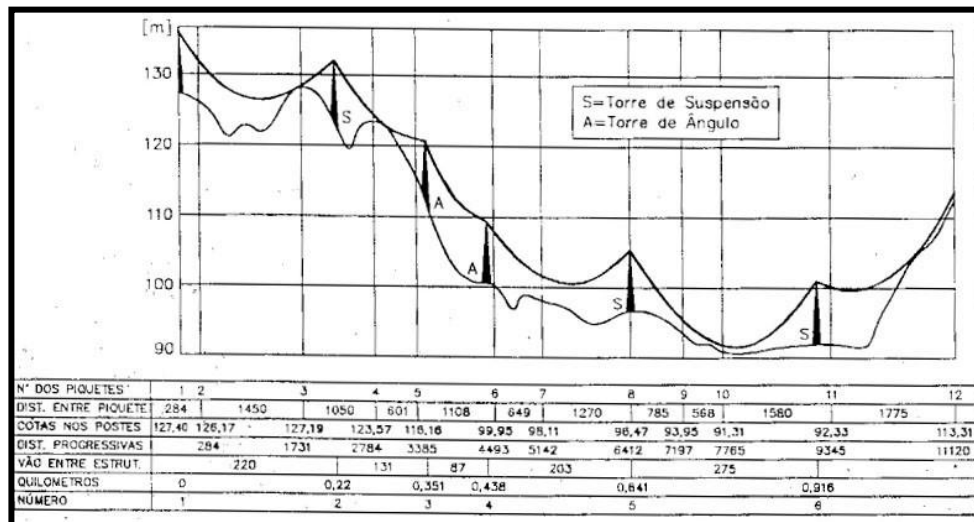
A locação das estruturas é feita após o levantamento topográfico. O processo mais usual é o gráfico, que utiliza o perfil longitudinal do eixo da faixa de servidão, como ilustra a Figura 4. O desenho de um perfil longitudinal fornece, além da topografia, outras informações cruciais para determinação da posição das estruturas na linha, tais como: tipos de vegetação e divisas, especificações de pontos obrigatórios para locação de estruturas, marcos, referências de nível e

estacas. A distribuição das torres é feita por trechos, começando com uma estrutura de início e fim de linha, e distribuindo as demais torres até o primeiro ponto obrigatório. As principais recomendações para uma locação de estruturas são: procurar obter o menor número de torres, uniformizar a distribuição das torres de forma que o vão básico entre elas sejam aproximadamente iguais, em travessias.

A escolha do tipo de torre depende do espaçamento mínimo e máximo entre as fases da configuração do isolador, do ângulo de proteção dos para-raios, das distâncias elétricas mínimas entre as partes energizadas e a torre, da flecha dos condutores, do número de circuitos e da altura de segurança. Conhecendo-se todos esses dados é possível fazer uma análise e selecionar a torre de maior viabilidade.

Feita a locação e a escolha do tipo de estrutura, define-se as quantidades de torres básicas, extensões, pernas e tipo de fundação para cada família de torre. Essas informações, somadas às especificações técnicas e às normas de projeto, são fundamentais para a elaboração da proposta de fornecimento e montagem das torres na Linha de Transmissão.

Figura 4 - Locação de torres no perfil topográfico



Fonte: Gontijo (1994).

Na implementação de uma Linha de Transmissão, consideram-se os seguintes itens: cabos condutores e para-raios, cadeias de isoladores e ancoragem, estruturas metálicas, fundações, montagem das estruturas e lançamento dos cabos. É importante avaliar o custo da linha por unidade de comprimento para que ele seja comparado com outras linhas de igual porte executadas anteriormente. A mesma avaliação pode ser feita para o peso das estruturas por unidade de comprimento da linha.

Na etapa do projeto executivo as estruturas concebidas são refinadas e calculadas a partir de parâmetros definitivos de cargas devido a ação do vento e do peso próprio de todos os

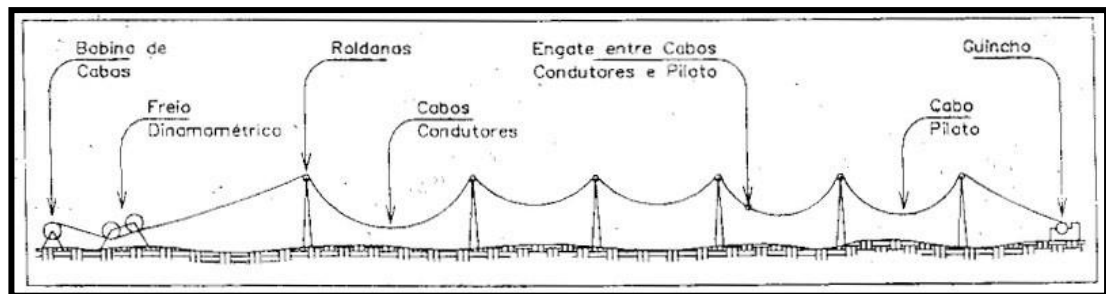
componentes da LT suportados pela torre. É nessa etapa que serão elaborados os desenhos de detalhamento das estruturas que serão fabricadas.

Após a aprovação do projeto executivo a estrutura pode ser fabricada e pré-montada. A pré-montagem é crucial pois poderá detectar erros no projeto de detalhamento que deverão ser corrigidos quando necessário, evitando-se assim, contratempos na construção da LT.

Em alguns casos, as estruturas podem ser testadas em escala real na estação de testes, onde são aplicadas as forças previstas em várias das hipóteses de carregamento para as quais as torres foram projetadas. São anotadas as tensões, através de medidores de deformação, e os deslocamentos.

Normalmente ao longo do trajeto da Linha de Transmissão não existem estradas para o transporte dos maquinários e equipamentos; dessa forma essa etapa conta com uma grande dificuldade técnica. Inicia-se com a fundação; depois a estrutura é montada e em seguida é a fase final de lançamento, tensionamento, nivelamento e fixação dos cabos. Os cabos são fornecidos em bobinas e seu lançamento na estrutura é feito conforme representado na Figura 5. São colocadas roldanas nos locais de apoio dos cabos da estrutura e, com o auxílio de um cabo piloto, tracionam-se os cabos por meio de um guincho e um freio em cada extremidade do tramo lançado. Deixa-os suspensos provisoriamente à espera do tensionamento e nivelamento de projeto, para então fazer a fixação definitiva.

Figura 5 - Lançamento dos cabos de uma Linha de Transmissão.



Fonte: Gontijo (1994)

METODOLOGIA

Neste artigo será realizado o estudo de uma torre estaiada com modelo de silhueta monomastro com cabeça reta, circuito duplo com disposição vertical simétrica dos condutores. Por se tratar de uma estrutura predominante na Linha de Transmissão foi previsto o ensaio de uma estrutura em escala real com os carregamentos previstos no projeto. Desta maneira, o coeficiente de minoração da estrutura foi adotado como 0,93.

Muitos dados já devem ter sido obtidos em relação às características da região, como o vento que atua onde a LT será construída e como estes se projetam na torre, a voltagem da linha, o tipo de circuito, a quantidade de para-raios, a aplicação necessária, ou seja, a função que a torre deverá exercer na linha, além de se saber se a estrutura será testada ou não. Para o dimensionamento das estruturas usam-se os seguintes fatores de resistência:

$\Phi_R = 0,93$ para estruturas submetidas a ensaios conforme NBR-8850 (1985);

$\Phi_R = 0,90$ para estruturas de suspensão não submetidas a ensaios;

$\Phi_R = 0,85$ para estruturas de ancoragem não submetidas a ensaios.

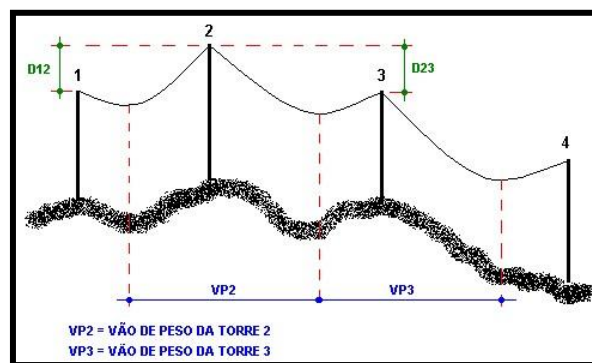
Para se calcular a estrutura da torre foram consideradas as seguintes características:

- Quantidade de circuito: circuito duplo, onde a torre suporta dois grupos de fases
- Quantidade de para-raios: dois
- Função da torre na LT: sustentação dos cabos através das cadeiras de isoladores e dos para-raios suspensos por aparelhos ou ancorados por ferragens.

A partir dessas características, pode-se determinar se essa estrutura de torre é uma estrutura de suspensão, que tende a ser utilizada em maior quantidade nas Linha de Transmissão nos trechos em alinhamento ou de pequenas deflexões. Sua maior vantagem é o baixo peso e apresenta menor carregamento para a fundação.

São considerados dois tipos de vãos entre as torres, vão médio (ou vão de vento) e o vão gravante (ou vão de peso). O vão de peso (Vp) é o tamanho do vão que a estrutura terá que suportar o peso dos cabos adjacentes a ela, portanto, esse valor é contabilizado na estrutura até o ponto mais baixo da catenária, conforme ilustrado na Figura 6.

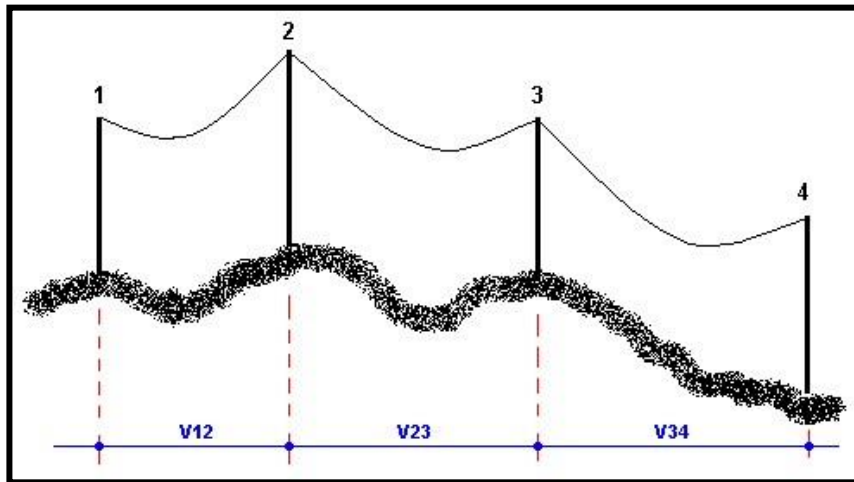
Figura 6- Exemplo de vão de peso em uma LT



Fonte: Portal Linha de Transmissão. Disponível em: http://www.linhadetransmissao.com.br/tecnica/lancamento_cabos_vao_de_peso.htm. Acesso em: 11/12/2022.

O vão de vento ou vão médio de uma torre é determinado pela média aritmética dos vãos adjacentes a essa estrutura, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Exemplo de vão de vento em uma LT



Fonte: Portal Linha de Transmissão. Disponível em: http://www.linhadetransmissao.com.br/tecnica/lancamento_cabos_vao_de_vento.htm. Acesso em: 11/12/2022.

Ambos os valores de vão são definidos no projeto eletromecânico da linha. Para a estrutura em estudo nesse projeto foram considerados os seguintes valores:

- Vão de vento básico da LT: 500m
- Vão de peso sem vento: 160m a 800m (condutor)
170m a 850m (para-raios)
- Vão de vento da torre: 550m, para 0° de deflexão
517m, para 1° de deflexão

O cálculo do vão de peso pode ser feito pela equação 1:

$$V_p = \frac{V_{12} + V_{23}}{2} - \frac{T_0}{W} \cdot \left(\frac{D_{12}}{V_{12}} + \frac{D_{23}}{V_{23}} \right) \quad (1)$$

Onde:

- V - Distância horizontal entre torres;
- D - Desnível entre os pontos de fixação dos cabos;
- T₀ - Tração horizontal nos cabos, em kgf (na temperatura considerada);
- W - Peso unitário do cabo, em kgf/m.

A deflexão de uma torre é definida no projeto eletromecânico e leva em consideração aspectos do terreno pelo qual a Linha de Transmissão será construída.

O cálculo do vão de vento pode ser feito pela equação 2:

$$V_v = \frac{V_{12} + V_{23}}{2} \quad (2)$$

Onde:

- V_v - Vão de vento da estrutura, em metros;
 V_{12} - Distância horizontal entre torres 1 e 2, em metros;
 V_{23} - Distância horizontal entre torres 2 e 3, em metros.

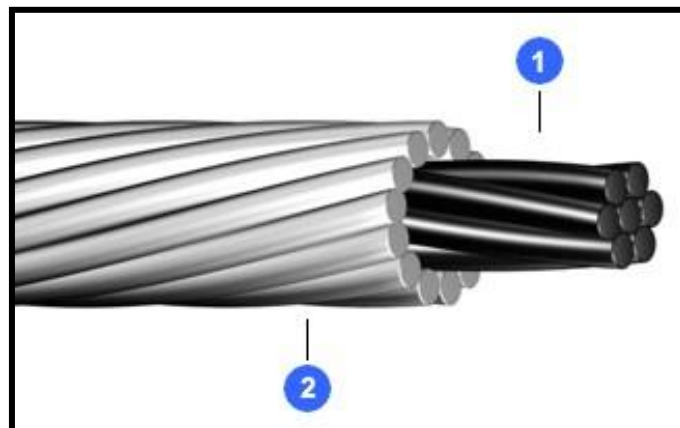
Os cabos de para-raios podem ser OPGW 13,4mm, ilustrado na Figura 8, ou CAA “Dotterel”, ilustrado na Figura 9.

Figura 8 - Exemplo de cabo OPGW 13,3mm



Fonte: Furukawa. Disponível em: <https://www.furukawatam.com/pt-br/catalogo-de-produtos-detalhes/cabo-opgw-dual-dg1030133---101mm2>. Acesso em: 11/12/2022.

Figura 9 - Exemplo de cabo Dotterel



Fonte: Induscabos. Disponível em: <https://www.induscabos.com.br/portfolio-item/fios-e-cabos-de-aluminio-nu-cao-acsr-extra-forte-acsr/>. Acesso em: 11/12/2022.

São analisados alguns dos materiais a serem utilizados na torre de transmissão.

O cabo condutor apresenta dois cabos por fase, que são o CAL 1120 1158,3 kcmil “Silicon”, ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Exemplo de cabo condutor CAL 1120



Fonte: HenanProvinceXinchangCopperCo., Ltd. Disponível em: <https://www.xctycable.com/product/conductor-de-aluminio-bs-215-parte-1/>. Acesso em: 11/12/2022.

Os aços estruturais e suas respectivas resistências estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados dos aços estruturais utilizados.

Tipos de aço	F_y (kgf/cm ²)	F_u (kgf/cm ²)
ASTM A36	2531	4077
ASTM A572 Grau 50	3515	4570
ASTM A572 Grau 60	4218	5273

Fonte: Perfis Gerdau. Disponível em: <https://www.jodi.com.br/wp-content/uploads/2020/12/Tabela-de-bitolas-Gerdau.pdf>. Acesso em: 11/12/2022

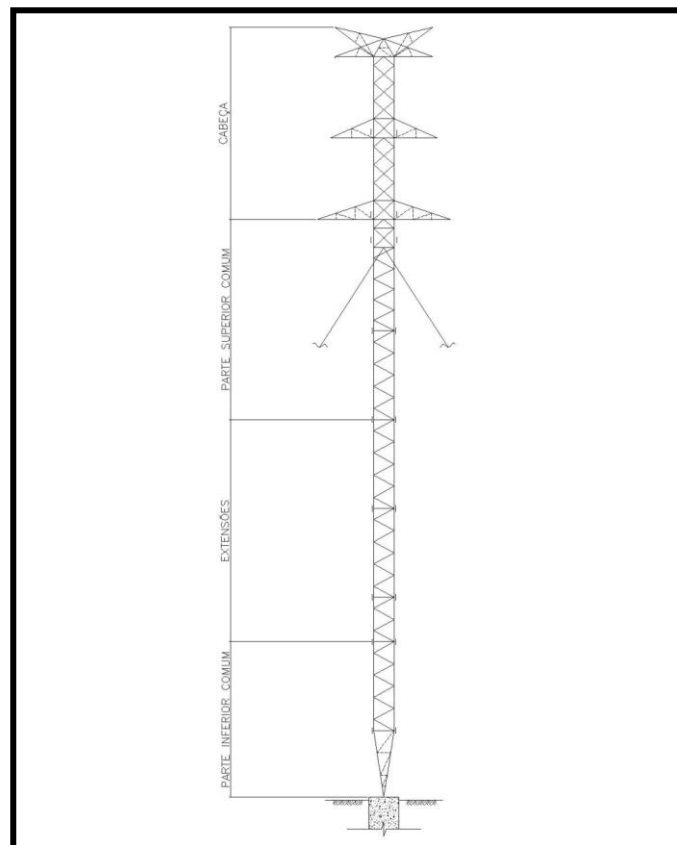
Os parafusos utilizados para as conexões das peças na estrutura tem característica ISO 4016 – Classe 5.8, com tensão admissível ao cisalhamento de 2620kgf/cm²

Os estais utilizados para estabilização da estrutura são uma cordoalha de aço de Extra Alta Resistência (EAR) e tem a característica de Estais de $\phi 7/8''$ (37 fios) com carga de ruptura mínima de 40.000kgf.

O cálculo estrutural foi feito com o auxílio do programa Tower (versão 14.20) que utiliza o método dos elementos finitos, realizando análise não-linear de estruturas reticuladas com o objetivo de se estudar todos os efeitos de segunda ordem na estrutura. O modelo estrutural empregado foi o de treliça espacial.

A primeira representação da estrutura foi elaborada em software de desenho técnico, sendo o mais popular o AutoCAD. Nele a estrutura tem sua configuração geométrica elaborada de modo a atender às distâncias elétricas de isolamento, alturas mínimas e máximas, ângulos de blindagem do para-raios e locação de estais dentro da faixa de servidão. A Figura 11 representa o esquema estrutural da silhueta básica da torre indicando as principais medidas. Para facilitar a modelagem e futura elaboração dos desenhos de detalhamento para fabricação, a estrutura foi dividida em quatro partes, de cima para baixo: Cabeça, Parte superior comum, Extensões e Parte inferior comum. Exceto as Extensões, as outras partes são comuns a todas as combinações de alturas de torre.

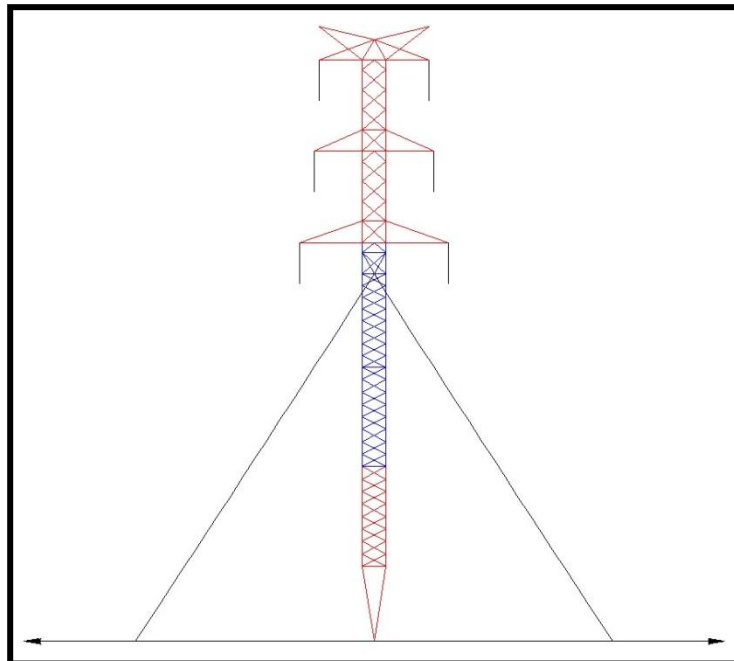
Figura 11 - Silhueta da torre elaborada no AutoCAD com a vista transversal



Fonte: Os autores.

De posse dos dados da LT definidos no projeto básico e das características geométricas elaboradas no AutoCAD, inicia-se a modelagem da estrutura. Para o dimensionamento da estrutura desse projeto foram elaborados 3 modelos estruturais em questão. O primeiro modelo, na sua menor altura, é ilustrado na Figura 12. Depois, é ilustrado na Figura 13 o modelo estrutural na sua maior altura. O terceiro, o maior modelo, é analisado com as barras redundantes previstas. Como as barras redundantes não tem função estrutural, servindo apenas para contraventamento dos perfis principais com o objetivo de diminuir o comprimento de flambagem, esse terceiro modelo tem a função de contabilizar a área obstruída do vento atuante na estrutura e o peso próprio desses elementos, que devem ser introduzidos nos outros dois modelos por meio de fatores que irão majorar esses efeitos em cada trecho da estrutura.

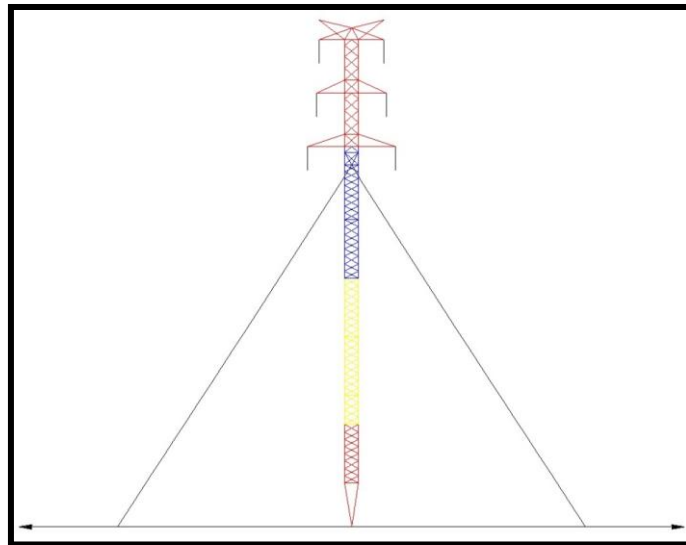
Figura 12 - Estrutura modelada em sua menor altura, vista transversal



Fonte: Os autores.

O primeiro passo antes de iniciar a modelagem da torre é introduzir as informações para elaboração das bibliotecas com o banco de dados de elementos estruturais, com as informações do tipo de aço, tensões admissíveis, tensões últimas e outras. Também serão elaboradas, de forma análoga, as bibliotecas dos parafusos, cabos, equipamentos e isoladores.

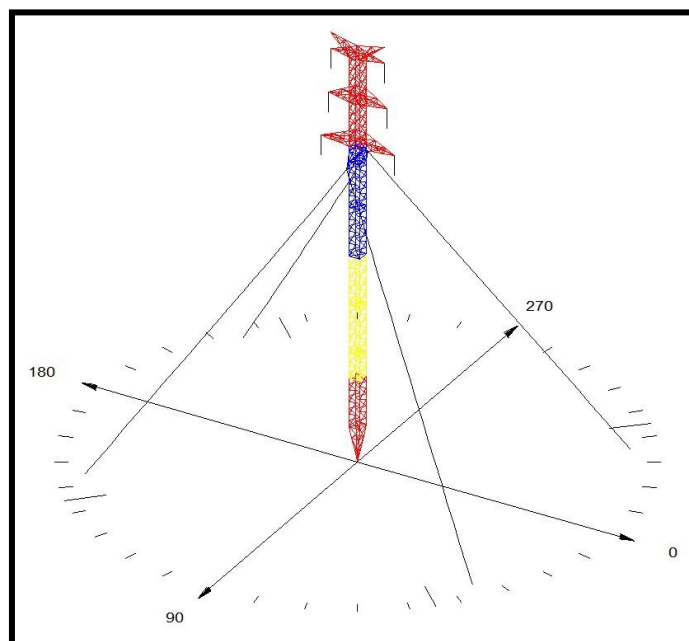
Figura 13 - Estrutura modelada em sua maior altura, vista transversal



Fonte: Os autores.

Usualmente para o projeto das torres das Linha de Transmissão considera-se para elaboração da memória de cálculo e do programa de testes, a maior altura da estrutura, uma vez que tendem a apresentar os maiores carregamentos. Na Figura 14 é apresentada a torre modelada na sua maior configuração no modelo tridimensional.

Figura 14 - Modelo tridimensional da torre



Fonte: Os autores.

O Tower utiliza o conceito de nós primários e nós secundários. Os nós primários são considerados “nós chaves” na definição da geometria da estrutura e os nós secundários são aqueles que sua posição é associada aos outros dois nós, podendo estes serem primários ou secundários.

Os eixos globais do programa seguem o sistema cartesiano direto como referência. Como as cargas gravitacionais (pesos próprios) são automaticamente calculadas pelo programa, o eixo Z é obrigatoriamente orientado para cima.

É também necessário que o eixo X seja orientado na direção longitudinal da Linha de Transmissão, e, conseqüentemente, da estrutura também. O eixo Y é perpendicular ao X e é orientado na direção transversal da LT.

No que diz respeito à simetria, os eixos X e Y definem quatro quadrantes. Ao modelar, pode-se adotar simetria com base nos eixos globais X e Y. Desta forma é possível modelar a estrutura de maneira mais rápida.

O primeiro quadrante é onde ambas as coordenadas são positivas. Os outros três quadrantes são orientados em torno do eixo Z em sentido horário ao observar de uma vista superior a estrutura.

Ao se utilizar o método de modelagem com simetria, o programa automaticamente adiciona um sufixo ao nome do nó ou perfil de modo a indicar se foi gerado individualmente ou se foi derivado como resultado de uma simetria.

Após as definições dos nós, as barras da estrutura são modeladas, indicando a quais grupos de barras pertence. Os grupos de barras, são aquelas que apresentam o mesmo tipo de seção transversal e aço estrutural, e com base nessas informações o programa irá utilizar o pior carregamento dentre esse grupo de barras, para dimensioná-la na etapa da análise estrutural. Com a estrutural totalmente modelada, é feita uma subdivisão de seções onde irá incidir o vento na estrutura.

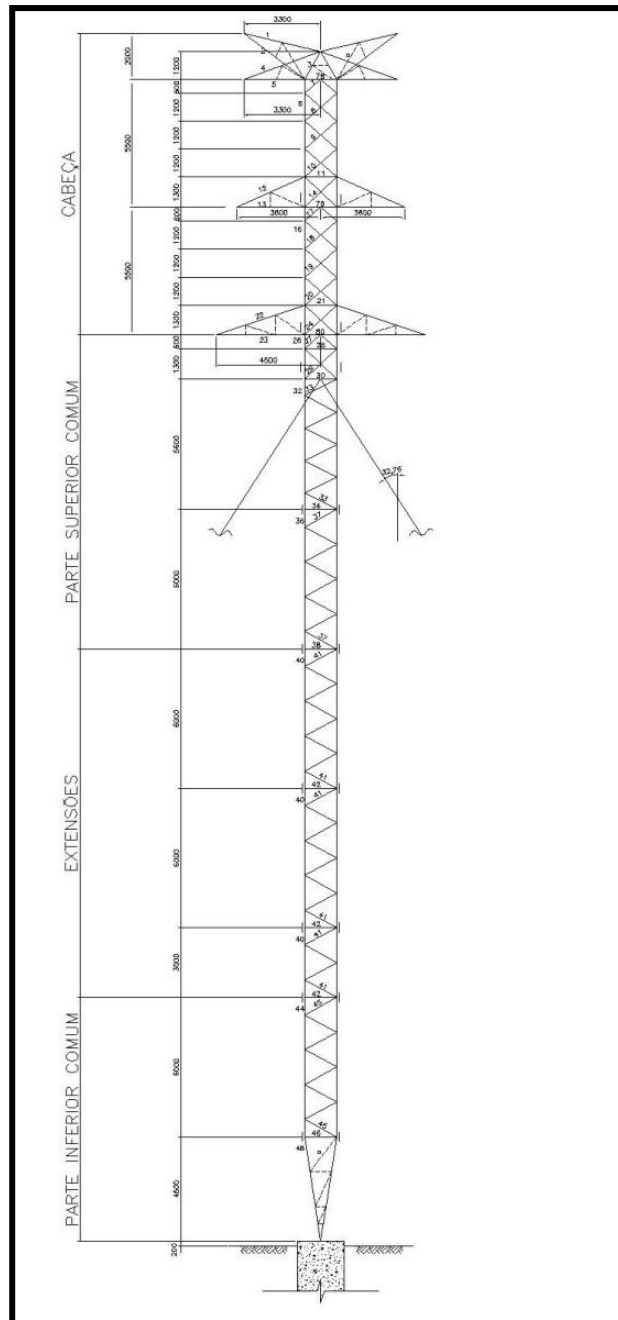
Essas seções não devem ser maiores que 12m. Essas seções também são essenciais para a aplicação dos fatores de majoração devido as barras redundantes.

O último passo da modelagem com o auxílio do programa Tower é “processar” a análise estrutural. Nessa etapa são gerados relatórios a respeito da modelagem e possíveis erros nas etapas anteriores. O programa permite a realização da correção interativa das barras sobrecarregadas. Este recurso é útil para substituir as barras que apresentem cargas solicitantes maiores que as resistentes. Nesse processo o programa apresenta uma lista de opções, em ordem de economicidade, para substituição.

O PROJETO DA TORRE

A análise estrutural e estudos de vento foram feitos a partir da modelagem de uma torre estaiada, monomastro reta, circuito duplo e condutores de configuração vertical simétrica. A Figura 15 detalha a silhueta da estrutura com as suas características.

Figura 19 - Silhueta com detalhes de perfis e cotas, vista transversal



Fonte: Os autores.

O dimensionamento da estrutura leva em consideração algumas definições básicas em relação aos cabos. Os cabos utilizados nas fases são de alumínio liga 1120, de formação de 61 fios, do tipo “Silicon” de 1158,3 kcmil. Para os cabos de para-raios tem-se as possibilidades do cabo “Dotterel” e/ou o cabo OPGW 13,4mm.

As torres são subdivididas em seções de até 12 metros de altura para aplicação das cargas de vento atuantes em suas estruturas. Essas seções irão apresentar “painéis” de obstrução à passagem do vento nas duas direções, longitudinal e transversal. A Tabela 2 mostra os itens que são levados em consideração nesses painéis. Com os resultados obtidos para obstrução do vento, essas cargas são aplicadas automaticamente pelo software na estrutura, quando o vento deve ser considerado na hipótese de cálculo.

Tabela 2 - Cargas em cada painel da torre

Painel	Altura (m)	Área Bruta (m ²)		Área Líquida (m ²)		Gt	Ab/Ae		Coef. de arrasto	
		Trans.	Long.	Trans.	Long.		Trans.	Long.	Trans.	Long.
1	51,0	1,40	11,12	1,210	2,110	2,559	0,864	0,190	1,795	2,989
2	47,9	5,88	5,88	1,200	1,270	2,536	0,204	0,216	2,924	2,871
3	45,2	1,82	5,59	0,710	1,270	2,511	0,390	0,227	2,238	2,823
4	42,4	5,88	5,88	1,480	1,560	2,484	0,252	0,265	2,721	2,666
5	39,7	1,82	6,76	1,080	1,920	2,454	0,593	0,284	1,818	2,594
6	38,1	4,74	2,66	2,000	1,530	2,435	0,422	0,575	2,149	1,841
7	34,3	7,84	7,84	2,510	2,510	2,387	0,320	0,320	2,462	2,462
8	28,5	8,40	8,40	2,640	2,640	2,300	0,314	0,314	2,482	2,482
9	22,5	8,40	8,40	2,020	2,020	2,197	0,240	0,240	2,767	2,767
10	16,5	8,40	8,40	2,020	2,020	2,080	0,240	0,240	2,767	2,767
11	12,0	4,20	4,20	1,040	1,040	1,982	0,248	0,248	2,737	2,737
12	10,0	8,40	8,40	2,090	2,090	1,936	0,249	0,249	2,732	2,732
13	10,0	3,15	3,15	1,160	1,160	1,936	0,368	0,368	2,303	2,303

Fonte: Relatório de dados do Tower, para a torre do projeto, elaborado pelos autores.

Onde:

Altura = altura média do painel, não inferior a 10,0m;

G_t = Fator de rajada (para terrenos com rugosidade B);

A_b = Área bruta do painel;

A_e = Área exposta ao vento;

C_a = Coeficiente de arrasto.

Com esses valores é possível se determinar as cargas de vento atuantes em cada painel para o vento extremo e para o vento de alta intensidade pelas equações 3 e 4 respectivamente. O valor da pressão de vento deve ser ajustado de acordo com o ângulo de incidência em cada painel.

$$F_w = q_0 \cdot G_t \cdot C_a \cdot A_e \quad (3)$$

$$F_{wi} = q_i \cdot C_a \cdot A_e \quad (4)$$

CARGAS MÁXIMAS ATUANTES NAS FUNDAÇÕES

Com a modelagem da estrutura é possível obter as cargas máximas atuantes na fundação, com base em todas as hipóteses previstas de carregamento. São apresentados os resultados da primeira hipótese de carregamento, que considera o vento transversal extremo, onde o vento atua de maneira perpendicular ao sentido da Linha de Transmissão. A Tabela 5 apresenta os resultados para a maior estrutura e a hipótese onde ela obteve o maior carregamento para a fundação, indicado em azul. Os valores incluem fatores de sobrecarga da estrutura e respectivas hipóteses de cargas, entretanto, não incluem fator adicional de sobrecarga específicos para a fundação.

Tabela 5 - Cargas na fundação do mastro

Hipótese	F_x (kgf)	F_y (kgf)	F_z (kgf)	Resultante horizontal (kgf)
H1	166	2992	-61222	2996
H6.1	648	158	-44581	667
H7.1	395	130	-38093	415
H9	0	199	-44621	199
H14	1218	179	-58912	1231

Fonte: Relatório de dados do Tower, elaborado pelos autores.

Onde:

F_x - Força na direção longitudinal da Linha de Transmissão;

F_y - Força na direção transversal da LT;

- F_z - Força vertical na fundação, valor negativo indica compressão;
 H1 - Hipótese de vento extremo transversal;
 H6.1 - Hipótese ruptura do condutor superior esquerdo;
 H7.1 - Hipótese ruptura do para-raio esquerdo;
 H9 - Hipótese de vento de tormentas transversal;
 H14 - Hipótese de contenção de cascata.

VERIFICAÇÕES DOS ESTAIS

Os estais devem ter utilização máxima de 75%, sendo que se deve minorar essa resistência pelo fator de minoração da estrutura também. Na torre analisada esse fator é de 0,93, portanto, a carga máxima de trabalho admissível para o estai de $\phi 7/8''$ é indicado na equação 5:

$$R_d = 0,93 \cdot 0,75 \cdot 40.000 = 27.900 \text{kgf} \quad (5)$$

Como a maior carga de tração obtida no projeto foi T_e com 23.407kgf, pode-se determinar a taxa de trabalho do estai pela equação 6, que fornece o resultado de 83%.

$$T_t = \frac{T_e}{R_d} \quad (6)$$

Os estais são fixados nas torres usualmente em chapas que devem ser verificadas quanto à resistência dos esforços atuantes e respectivas ferragens de fixação

CONCLUSÕES

Foi consideranda a importância da energia elétrica para a sociedade atual. As Linhas de Transmissão aéreas ainda são o meio predominante de transmissão de energia elétrica por alinhar custos relativamente baixos, comparadas com as outras soluções, com eficiência e precisão. A pesquisa mostrou que respeitar todas as etapas do processo, desde a escolha da linha até a montagem da torre na linha, é crucial para que não ocorram falhas futuras.

Com o avanço das tecnologias e dos softwares de análise estrutural e detalhamento, os resultados previstos dos cálculos estão cada vez mais fiéis aos resultados reais, que são aferidos em testes de carregamento. Essas inovações permitem a concepção de estruturas mais eficientes

e, possivelmente, de menor custo. A realização de pré-montagem e do teste de carregamento, detectam possíveis erros, evitando-se assim, falhas que causariam enormes prejuízos, não apenas às empresas diretamente envolvidas, como também para os clientes finais da sociedade que dependem do fornecimento da energia elétrica para o bem-estar social e desenvolvimento do país.

Ainda que a pretensão do futuro seja a busca por energias renováveis, as torres de transmissão de energia elétrica ainda serão utilizadas por muito anos. Assim, o presente trabalho empresta um conhecimento profundo de como essas estruturas são idealizadas, calculadas e montadas, destacando-se a função essencial do engenheiro civil em projeto de linha de transmissão.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE-10-15** - Design of Latticed Steel Transmission Structures. New York. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 5422** - Projetos de linhas aéreas de transmissão elétrica. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 8842** - Suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão - Resistência ao carregamento. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 8850** - Execução de suportes metálicos treliçados para linhas de transmissão. Rio de Janeiro, 1985.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE-10-15** - Design of Latticed Steel Transmission Structures. New York. 2015

BLOG TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO. Acesso em: 27/11/2022. Disponível em:

<https://transmissao108196393.wordpress.com/2020/03/28/estruturas-para-linhas-de-transmissao-e-distribuicao/>.

INTERNATIONAL ELETROTHECNICAL COMISSION. **IEC-60826** - Design Criteria of Overhead Transmission Lines. Genebra, 2017.

GONTIJO, Carlos Roberto. **Cálculo de torres para linhas de transmissão**. Belo Horizonte: Instituto de Engenharia Aplicada Editora, 1994.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Anuário estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro, 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Acesso em: 21/11/2022. Disponível em:

<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>.